

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

3.3.- ESTUDIO PARAMETRICO DE LA SECCION CAJON

Del análisis de los resultados obtenidos del estudio paramétrico de puentes losa maciza de hormigón se derivan algunas conclusiones relativas a diversos parámetros, las cuales, ya se ha comentado brevemente con anterioridad en el apartado 3.2, pueden ser extrapoladas a puentes con otras tipologías transversales.

Así, se ha dejado constancia de que la influencia de las propiedades térmicas y de la emisividad del hormigón sobre las distribuciones del campo de temperaturas en puentes losa no es significativa. Dicha conclusión es perfectamente extrapolable a puentes cajón y, por consiguiente, del conjunto de propiedades estructurales y térmicas del hormigón que se presenta en la tabla 3.1, únicamente se estudiará y analizará, para la tipología transversal que nos ocupa -puentes cajón-, la influencia del factor de absorción solar y del espesor de la capa asfáltica de rodadura.

En cuanto a las condiciones climatológicas y ambientales, la influencia del valor de la temperatura ambiente media sobre la magnitud de las tensiones autoequilibradas y de los gradientes térmicos e incrementos relativos diarios de temperatura media en puentes losa maciza es despreciable. Tal conclusión permite ser extrapolada a la tipología transversal de sección en cajón y, por lo tanto, únicamente se realizarán los estudios paramétricos correspondientes al rango de variación diaria de la temperatura ambiente, a la velocidad del viento, al factor de turbidez y al día del año.

En lo relativo al emplazamiento del puente, se concluyó que la altitud no juega un papel preponderante en los perfiles obtenidos de distribuciones de temperaturas en puentes losa mientras que la latitud sí era uno de los parámetros que influía de forma notable. El analizar puentes de sección en

cajón no introduce ningún cambio en lo que se refiere a la consideración del primero de estos factores pudiendo obviarse, por consiguiente, el estudio paramétrico relativo a la altitud del lugar en donde se emplaza el puente. Por otra parte, también se llegó a la conclusión de que la influencia del azimut del puente era poco notoria. Ahora bien, la diferente tipología transversal a analizar nos ha conducido a estudiar dicho parámetro con objeto de visualizar y cuantificar su influencia sobre el gradiente térmico transversal y sobre las distribuciones tensionales a través de las almas del cajón.

Resumiendo, en el estudio paramétrico de puentes cajón se analizarán los siguientes parámetros:

- Propiedades térmicas y estructurales:

Factor de absorción solar

Espesor de capa asfáltica

- Condiciones ambientales:

Rango de variación diaria de la temperatura ambiente

Velocidad del viento

Factor de turbidez

Día del año

- Localización y orientación del puente:

Latitud

Azimut

Posteriormente y debido a las propias características geométricas de la sección transversal en cajón se analizarán diversas relaciones de índole geométrico que pueden incidir en los resultados obtenidos relativos a distribuciones tensionales y a acciones térmicas. Tales relaciones son las siguientes:

- Relación espesores ala-alma
- Relación longitud de voladizo-canto del alma
- Variación de canto de la sección cajón
- Existencia de cartelas.

La metodología a seguir de cara a la presentación de resultados es la misma que la utilizada en el desarrollo de los estudios paramétricos de los puentes losa maciza. Ahora bien, dada la propia configuración geométrica de la sección transversal de los puentes en cajón -existencia de almas y de células interiores- se cree oportuno el presentar las distribuciones térmicas y tensionales según varios ejes verticales. Ello permitirá observar la diferente respuesta térmica en función del eje que se contemple. Por otra parte, se presentarán y analizarán gráficas relativas a la evolución y evaluación de la temperatura en el interior de las células que, como se verá con posterioridad, será de sumo interés cara a la obtención de distribuciones de tensiones térmicas transversales contenidas en el plano de la sección.

En efecto, el aire en el interior de la célula conserva durante un tiempo su calor mientras la temperatura ambiental baja. La diferencia de temperaturas a la que se ven sometidas las alas y almas que envuelven dicha célula origina unos momentos de flexión contenidos en el plano de la sección a causa del propio hiperestatismo interno del cajón (análisis como marco hiperestático). Dichos momentos producen tracciones en las fibras exteriores de alas y almas -tensiones secundarias transversales- que incluso pueden verse aumentadas al considerar las tensiones de tracción que se originan en ambas caras de alas y almas debidas a la existencia de una distribución no plana de temperaturas -tensiones primarias transversales-.

Si además las fibras sometidas a estas tracciones transversales se ven solicitadas con una compresión longitudinal -estado biaxial de tensiones- la resistencia a tracción del hormigón puede verse reducida.

Todo ello nos lleva a pensar que la sollicitación transversal por temperatura en puentes cajón, cuyo tratamiento no está prescrito en la mayoría de las normativas vigentes, puede causar tensiones de tracción considerables y, en algunos casos, fisuración o agrietamiento cuando la sección no se encuentra armada debidamente (Leonhardt, Kolbe y Peter (56), Leonhardt y Lippoth (57)).

El desarrollo de los estudios paramétricos se llevará a cabo, inicialmente, en puentes cajón unicelulares pasando, a continuación, a analizar los puentes cajón multicelulares.

3.3.1.- Puentes de sección en cajón unicelulares

La sección cajón a analizar corresponde a la sección transversal de un puente de hormigón pretensado emplazado en Calgary, Canadá. Las razones por las cuales se estudia este puente son que se tiene conocimiento de algunas de las variables que influyen en la respuesta térmica y tensional a nivel sección así como de resultados relativos a distribuciones de temperaturas y curvaturas térmicas impuestas. Toda esta información se recoge en las referencias bibliográficas de Elbadry y Ghali ((32), (33)). La sección transversal y la discretización en diferencias finitas empleada en el estudio paramétrico se presentan en la figura 3.49.

El estudio básico de referencia viene definido por los valores de las propiedades estructurales, factores ambientales y emplazamiento del puente que se presentan en la tabla 3.7. Los valores adoptados por las variables ambientales y climatológicas corresponden a la situación existente en el lugar de emplazamiento de la estructura, los cuales pueden encontrarse en las referencias últimamente citadas.

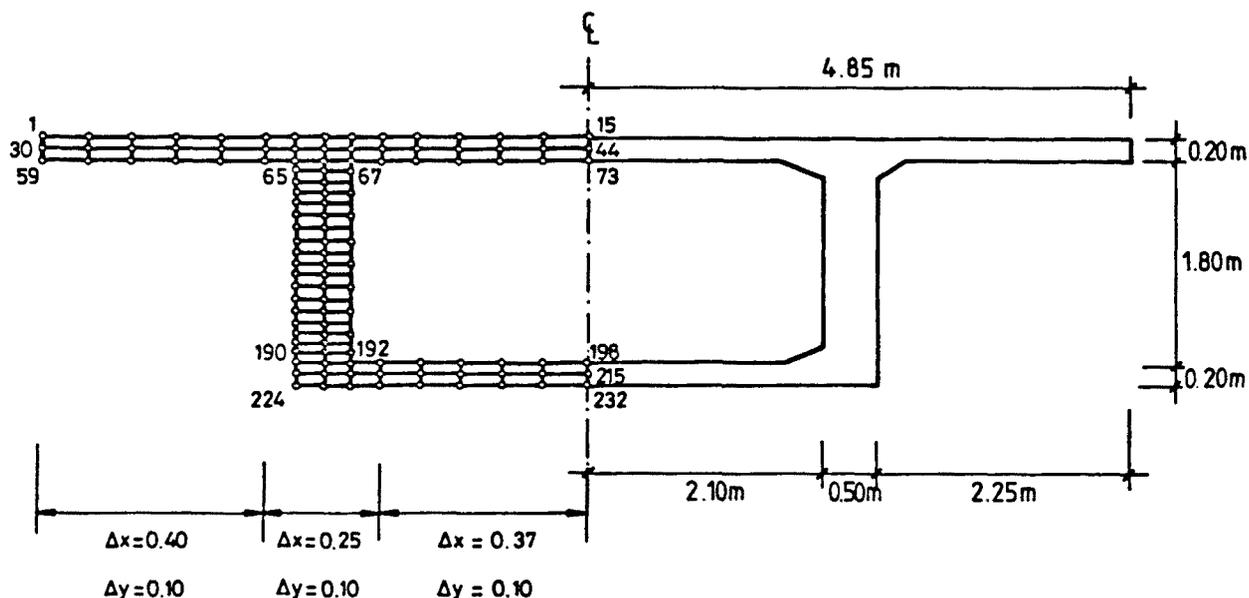


Fig. 3.49.- Sección cajón analizada paramétricamente. Discretización en diferencias finitas.

| | | |
|---|--|--------------------|
| 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) | 8x10 ⁻⁶ |
| | Módulo de elasticidad (Kp/cm ²) | 273860. |
| | Capa asfáltica de rodadura | --- |
| Condiciones ambientales | Temperatura ambiente media (°C) | -5.0 |
| | Rango variación temp. amb. (°C) | 20.0 |
| | Velocidad viento (m/seg) | 1.0 |
| | Factor de turbidez | 1.8 |
| | Día analizado | 21 Marzo=81. |
| Localización y orientación | Latitud (°N) | 51.03 |
| | Altitud (m) | 1050. |
| | Azimut (°) | eje E-0=0. |

Tabla 3.7.- Valores adoptados por diversos parámetros en el estudio de referencia.

De nuevo 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 que podrían ser consideradas como "condiciones medias" a lo largo del año.

3.3.1.1.- Influencia de los parámetros físicos, ambientales y de emplazamiento

Superficie de rodadura

En el caso de que la superficie de rodadura sea el propio hormigón estructural del tablero, el único parámetro a analizar será el factor de absorción solar del hormigón. Ya se ha mostrado con anterioridad que la radiación solar absorbida por el tablero es proporcional al valor que adopte dicho factor. Aunque este parámetro, tal como se ha dicho, presenta un cierto rango de variación dependiendo del tipo de cemento y del tipo de árido y del estado y color de la superficie expuesta, dicho rango es pequeño. Es por ello por lo que muchos investigadores no analizan este parámetro, adoptando para el mismo un valor constante de 0.5; es decir, de la radiación solar incidente sobre el tablero y, si ha lugar, sobre las almas, sólo el 50% de dicha radiación es absorbida por el material y conducida a través de él en forma de energía calorífica mientras que el otro 50% se ve reflejada. (Zichner (97), CEB (23), Dilger et al. (28), Elbadry y Ghali (32), (33)).

Los resultados obtenidos para un factor de absorción solar de 0.5 -la superficie de rodadura es el hormigón estructural- se comparan y analizan conjuntamente con los obtenidos para la misma sección transversal suponiendo que se dispone una capa asfáltica de rodadura de espesor variable. Las características térmicas adoptadas para el asfalto, las cuales se presentan en la tabla 3.8, han sido extraídas de diversas fuentes bibliográficas (Priestley, Buckle (85), Emerson (37), Elbadry Ghali (32)). De todas las nuevas variables o parámetros que introduce el disponer una capa asfáltica de rodadura en la resolu-

ción de la ecuación diferencial que gobierna el fenómeno de la transmisión de calor en puentes de hormigón, es el espesor de dicha capa el que influye de forma más notoria en el perfil y magnitud de las distribuciones del campo de temperaturas.

| Propiedades térmicas del asfalto | |
|----------------------------------|-------|
| Conductividad térmica (W/m°C) | 0.83 |
| Calor específico (J/kg°C) | 880. |
| Densidad (kg/m ³) | 2200. |
| Factor de absorción solar | 0.9 |
| Emisividad | 0.92 |

Tabla 3.8.- Valores característicos de las propiedades térmicas del asfalto adoptados en el estudio paramétrico.

En consecuencia, los resultados que se presentan a continuación serán función del tipo de superficie de rodadura -hormigón o asfalto- y, en este último caso, del espesor de capa asfáltica adoptado en el análisis.

La figura 3.50 muestra las distribuciones térmicas y tensionales correspondientes a los instantes en que se generan, para cada uno de los casos analizados, los máximos gradientes térmicos o curvaturas impuestas. Dichas distribuciones tienen lugar según el eje de simetría de la sección y según el eje vertical de simetría del alma.

En dicha figura puede observarse que a medida que aumenta el espesor de capa asfáltica menor es la temperatura en la fibra superior de la sección cajón. A la vista de los resultados se aprecia que para que la capa asfáltica de rodadura adquiera un cierto carácter aislante es necesario disponer un mínimo espesor. Así pues, si se comparan las distribuciones de temperaturas obtenidas para diferentes espesores de asfalto con la distribución correspondiente a la misma losa suponiendo que la superficie de rodadura es el propio hormigón estructural, se observa que la temperatura en la fibra superior del tablero de hormigón es similar entre sí cuando el espesor de asfalto se encuentra alrededor de los 10 cms.

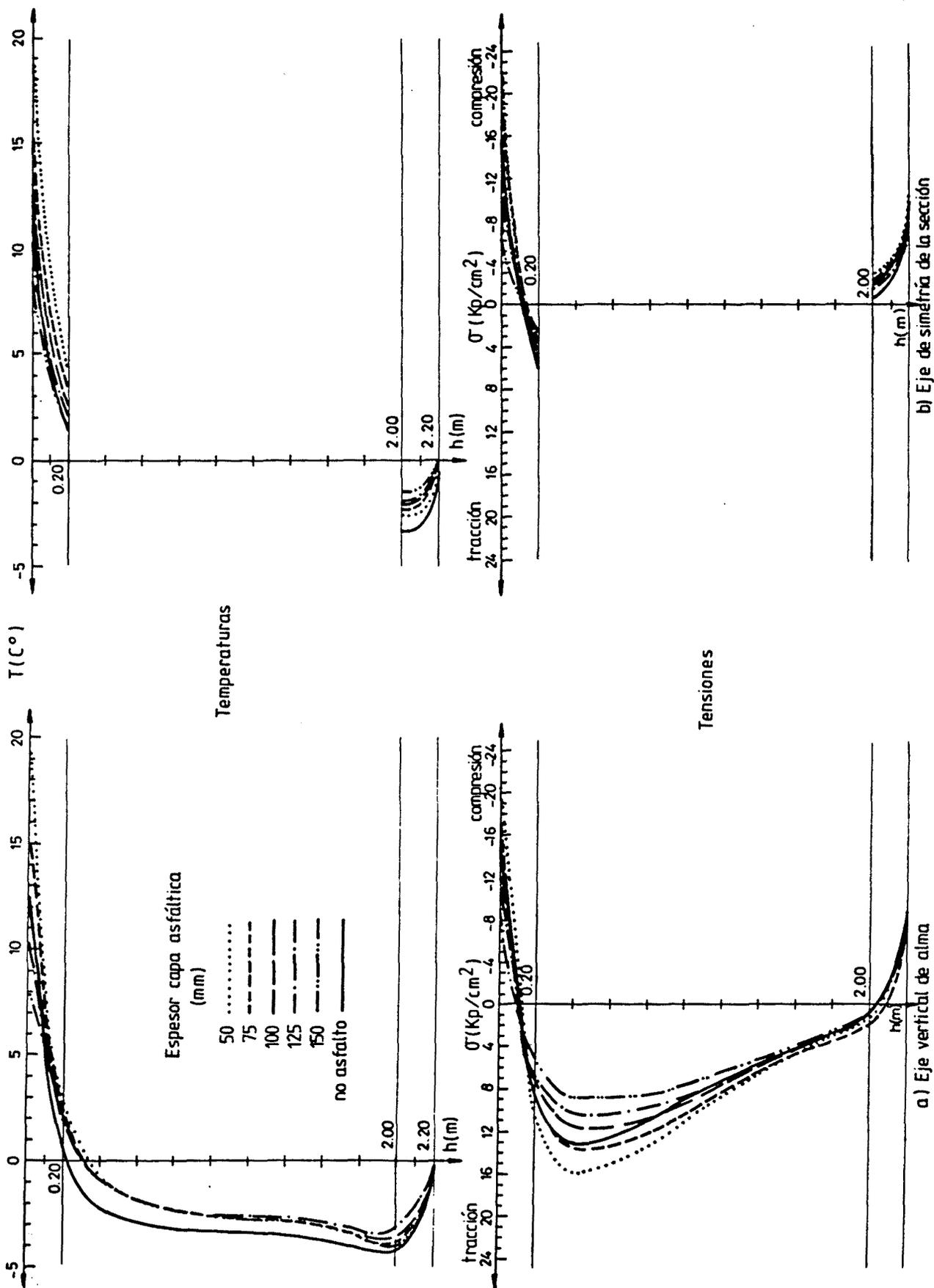


Fig. 3.50.- Distribuciones de temperaturas y tensiones en la sección cajón correspondientes a instantes de máximo gradiente térmico para diferentes espesores de capa asfáltica.

En resumen, para espesores de capa asfáltica menores que 10 cms. la influencia del factor de absorción solar del asfalto es más importante que la de la baja conductividad del mismo mientras que para espesores mayores que 10 cms. ocurre lo contrario.

La citada figura 3.50 evidencia el hecho de que cuanto más pequeño es el espesor de capa asfáltica más acusada es la no linealidad del campo de temperaturas y, por lo tanto, mayores son las tensiones autoequilibradas primarias. Por otra parte, el que el factor de absorción del asfalto sea elevado hace que el calor transferido por radiación solar aumente con respecto al caso en el que se estudie el puente cajón sin capa asfáltica. Ello supondrá un mayor valor de la temperatura en las fibras intermedias de la sección cajón lo cual inducirá una distribución del campo térmico más cercana a una distribución plana. Así, al comparar las distribuciones de tensiones correspondientes a los casos de puente cajón sin capa asfáltica y con capa asfáltica de espesor 10 cms., se observa que se alcanzan mayores niveles de tensión en el primer caso.

Las figuras 3.51.a y 3.51.b muestran las evoluciones diarias del gradiente térmico vertical y de la temperatura media de la sección cajón respectivamente.

En la primera de ellas puede apreciarse que cuanto menor es el espesor de la capa asfáltica de rodadura mayor es el rango de variación del gradiente térmico, obteniéndose así mismo los mayores gradientes verticales máximos. Por otra parte, es de interés señalar que a medida que la capa de asfalto presenta un mayor espesor, mayor es la influencia de la baja conductividad térmica de este material y ello deriva en un retraso temporal en lo que se refiere al instante para el cual se alcanzan los máximos gradientes térmicos. Por ejemplo, la sección cajón con un espesor de asfalto de 5 cms. alcanza su máximo gradiente a las 15.30 horas mientras que, esa misma sección cajón, con un espesor de 15 cms. lo alcanza a las 18.70 horas.

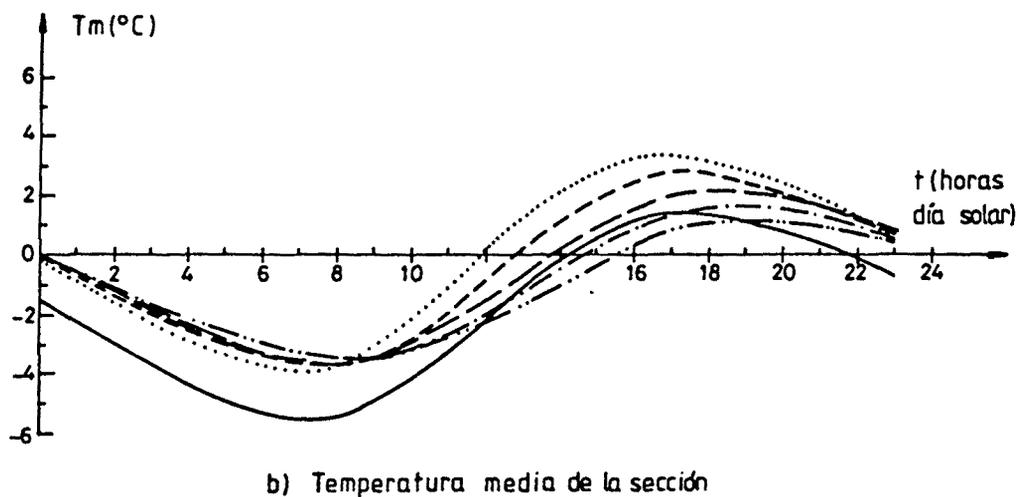
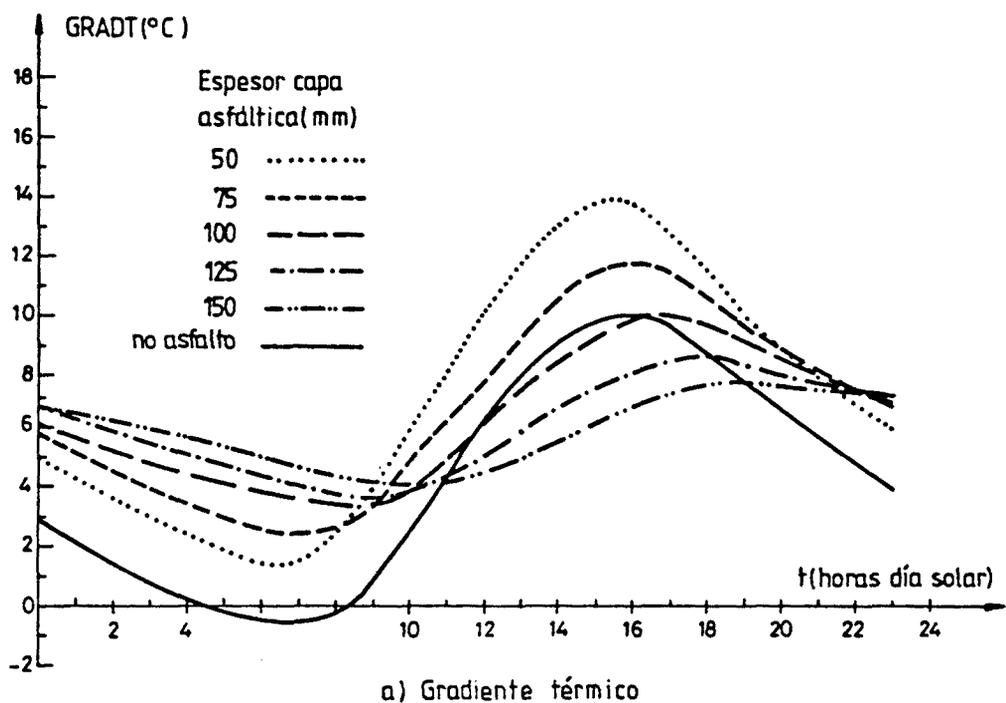


Fig. 3.51.- Evolución diaria del gradiente térmico y de la temperatura media de la sección para diferentes espesores de capa asfáltica.

La figura 3.51.b presenta las gráficas correspondientes a la evolución de la temperatura media de la sección para diferentes espesores de capa asfáltica. En ellas se observa que cuanto menor es el espesor de asfalto mayor es la oscilación o rango de variación diaria de la temperatura media de la sección y mayor es la temperatura media máxima de la sección. Al igual que ocurría con el gradiente térmico, los máximos de la temperatura media, a medida que aumenta el espesor de capa asfáltica, sufren un retraso temporal debido a la mayor influencia de la baja conductividad del asfalto.

Por otra parte, si se comparan para cada espesor analizado los instantes para los cuales tienen lugar el máximo gradiente y la máxima temperatura media de la sección se aprecia que esta última tiene lugar con un desfase temporal de 1 a 2 horas con respecto al instante de aparición de máximo gradiente. Ello es propio del fenómeno de transmisión de calor y de la variación de la temperatura a lo largo de la profundidad de la sección cajón. Puede observarse también que las temperaturas medias de la sección cajón con capa asfáltica de espesor menor o igual a 12 cms. -espesores usuales- son mayores que las obtenidas para la sección cajón sin capa de asfalto.

Debido a la propia tipología transversal de las secciones en cajón es de interés el observar cómo varía la temperatura en el interior de la célula a lo largo del día y comparar dicha variación con la que experimenta la temperatura media de la sección. La figura 3.52 muestra los resultados relativos a la variación diaria de tales temperaturas, correspondientes a la sección cajón sin capa asfáltica y con un espesor de capa asfáltica de 7.5 cms.

Comparando entre sí las gráficas presentadas se observa que los rangos de variación diaria de la temperatura en el interior de la célula son menores que los correspondientes a la temperatura media de la sección y ello ocurre independientemente de si se dispone o no capa asfáltica de roda-

dura. También puede observarse que las curvas de evolución de la temperatura de la célula presentan un aspecto similar a las de la temperatura media apreciándose, sin embargo, un cierto desfase horario, próximo a 4 horas, entre los instantes para los cuales se alcanzan los máximos y mínimos de ambas funciones.

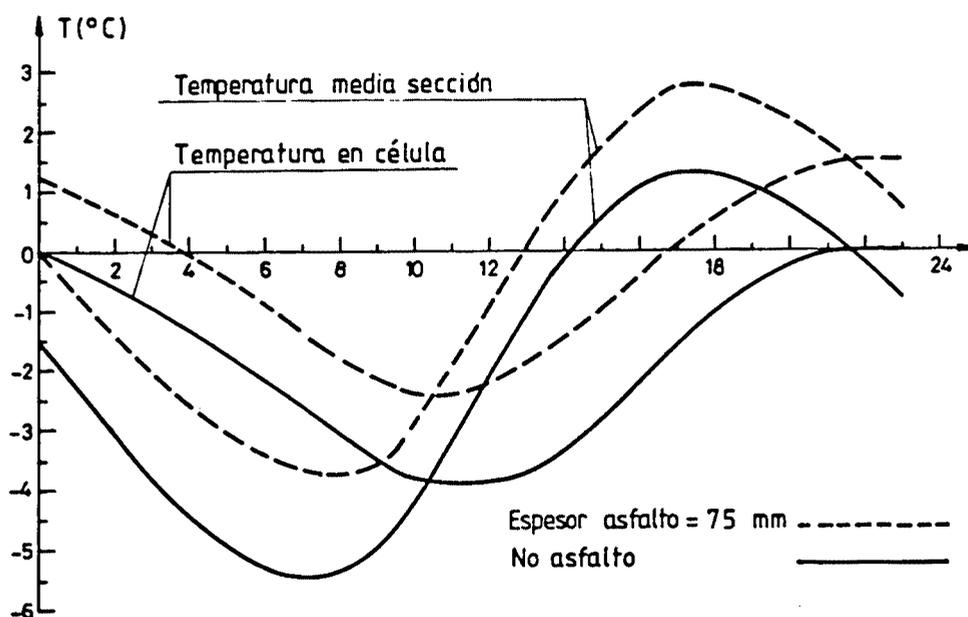


Fig. 3.52.- Evolución diaria de la temperatura en el interior de la célula.

Por otra parte, y haciendo alusión directa a lo expuesto en el apartado 3.3, es interesante remarcar el hecho de que existen diferencias notables entre los valores de la temperatura ambiente exterior y la temperatura en el interior de la célula. En este caso, dichas diferencias alcanzan unos valores máximos en torno a los 15°C para el caso de existencia de capa asfáltica y en torno a los 14°C para el caso en el que no se disponga ésta y acaecen en aquellos instantes en los que la célula mantiene su temperatura y la temperatura ambiente exterior desciende, es decir, entre las 22 horas y

las 7 horas de la mañana. La figura 3.53 refleja la evolución diaria de dichas diferencias de temperatura entre el interior de la célula y el exterior para diferentes espesores de capa asfáltica y para el caso en el que la superficie de rodadura sea el propio hormigón estructural de la sección en cajón

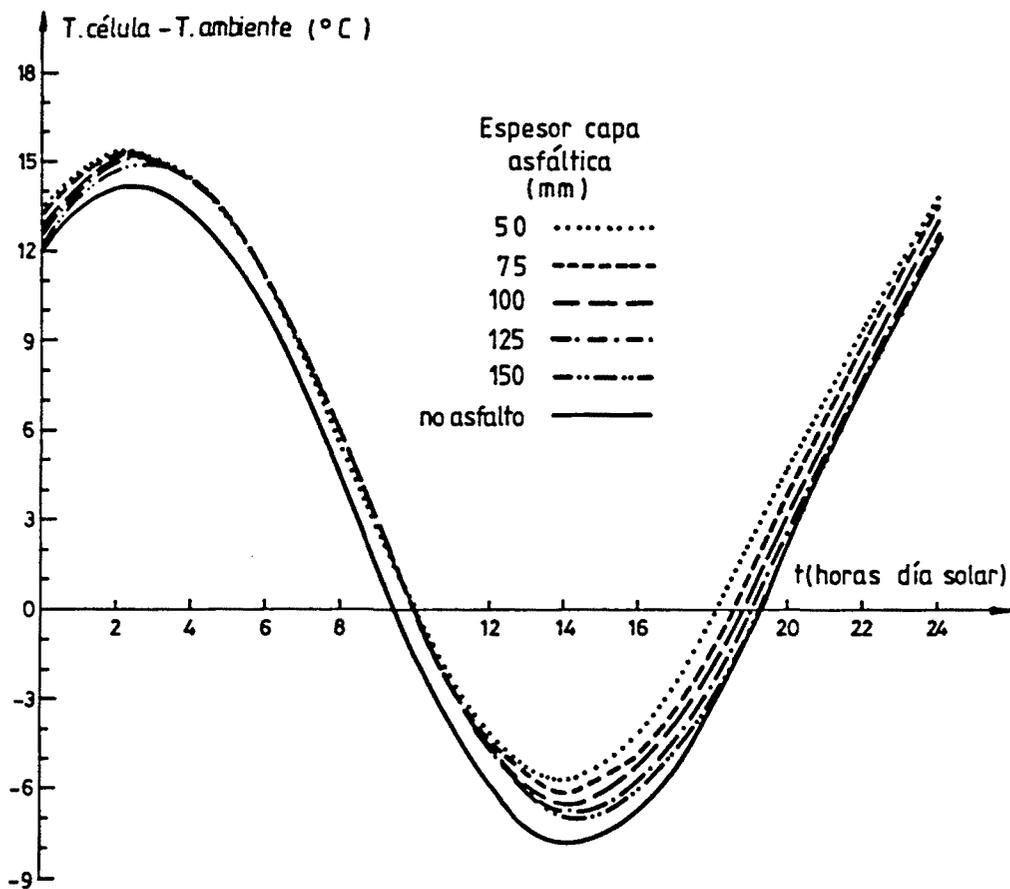
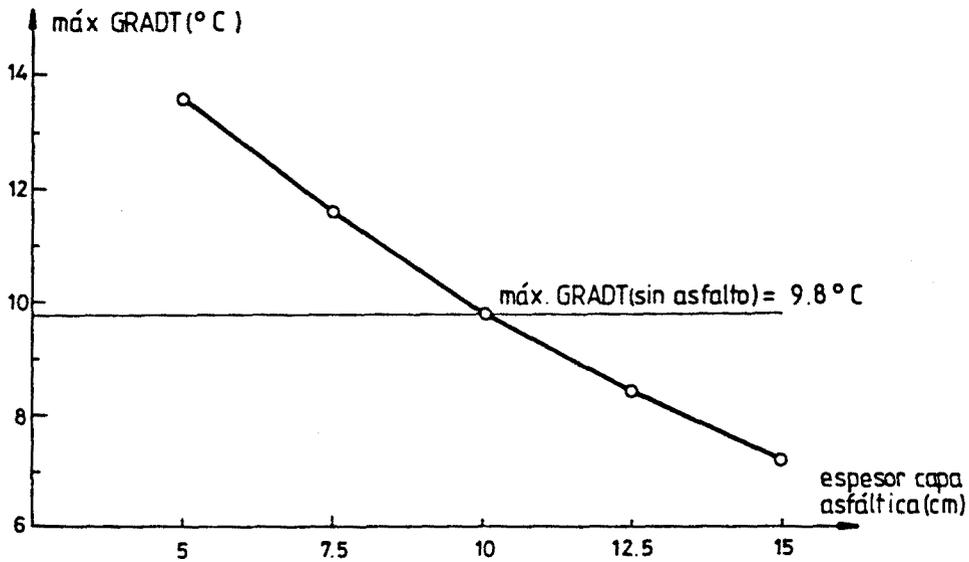


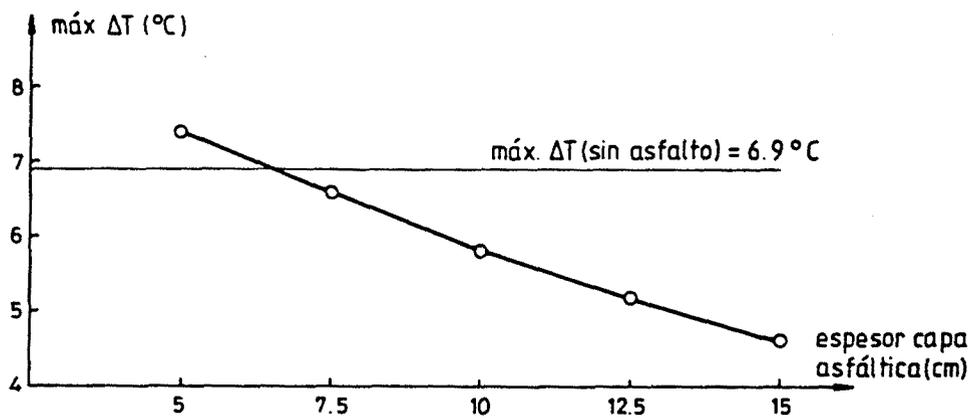
Fig. 3.53.- Evolución diaria de la diferencia de temperaturas entre el interior de la célula y el exterior para diferentes valores del espesor de capa asfáltica.

En ella puede observarse que el espesor de asfalto no influye de forma apreciable en la magnitud de las diferencias de temperaturas existentes entre el interior del cajón y el exterior. No obstante, la presencia de capa asfáltica acentúa algo más esas diferencias con respecto a los valores obtenidos en la sección cajón sin capa de rodadura.

Las figuras 3.54.a y 3.54.b muestran, respectivamente, la influencia del espesor de asfalto sobre los valores que adoptan los máximos gradientes térmicos positivos y los incrementos relativos de temperatura media de la sección.



a) Máximos gradientes térmicos positivos



b) Máximos incrementos relativos de temperatura media

Fig. 3.54.- Influencia del espesor de la capa asfáltica sobre los máximos gradientes y los incrementos relativos de temperatura media.

En dichas figuras puede observarse que cuanto menor es el espesor de capa asfáltica mayores son los gradientes térmicos y los incrementos relativos de temperatura media. Además, puede apreciarse de nuevo la existencia de un cierto espesor, en torno a los 10 cms., a partir del cual y para valores superiores a él, las acciones térmicas son de menor magnitud que las que incidirían sobre la estructura si la superficie de rodadura fuera el hormigón del tablero.

En lo relativo a la magnitud de los gradientes térmicos transversales, ésta es algo mayor que la existente en puentes losa maciza ya que, según esta dirección, la masa de hormigón se encuentra concentrada en las dos almas del cajón con lo cual el salto térmico entre uno y otro paramento lateral es algo más acusado que en el caso de que no existieran células o aligeramientos, como ocurre en puentes losa maciza. No obstante, la magnitud que alcanzan tales gradientes es insignificante no superándose en ningún momento el valor de 0.6°C .

A continuación, la figura 3.55 muestra distribuciones tensionales según diversos ejes verticales, correspondientes a los instantes en que tiene lugar la máxima tensión de tracción para cada uno de los valores que adopta el espesor de capa asfáltica.

Un análisis de dichas distribuciones a lo largo del día analizado permite vislumbrar dos instantes para los cuales aparecen tensiones máximas de tracción en el hormigón y son en horas de madrugada, entre las 4 horas y 5 horas, y en horas comprendidas entre el mediodía solar y el instante para el cual se alcanza la máxima temperatura media de la sección.

A la vista de los resultados obtenidos puede concluirse que en horas de madrugada las zonas solicitadas a máximas tracciones son las esquinas de la sección y los paramentos laterales exteriores de las almas del cajón mientras que en horas posteriores al mediodía solar dichas tracciones tienen lugar en la zona de almas, en su unión con el ala superior, siendo las fibras más solicitadas las que pertenecen al eje vertical de simetría del alma y al eje que contiene el paramento lateral interior del alma, el cual está en contacto con el aire de la célula.

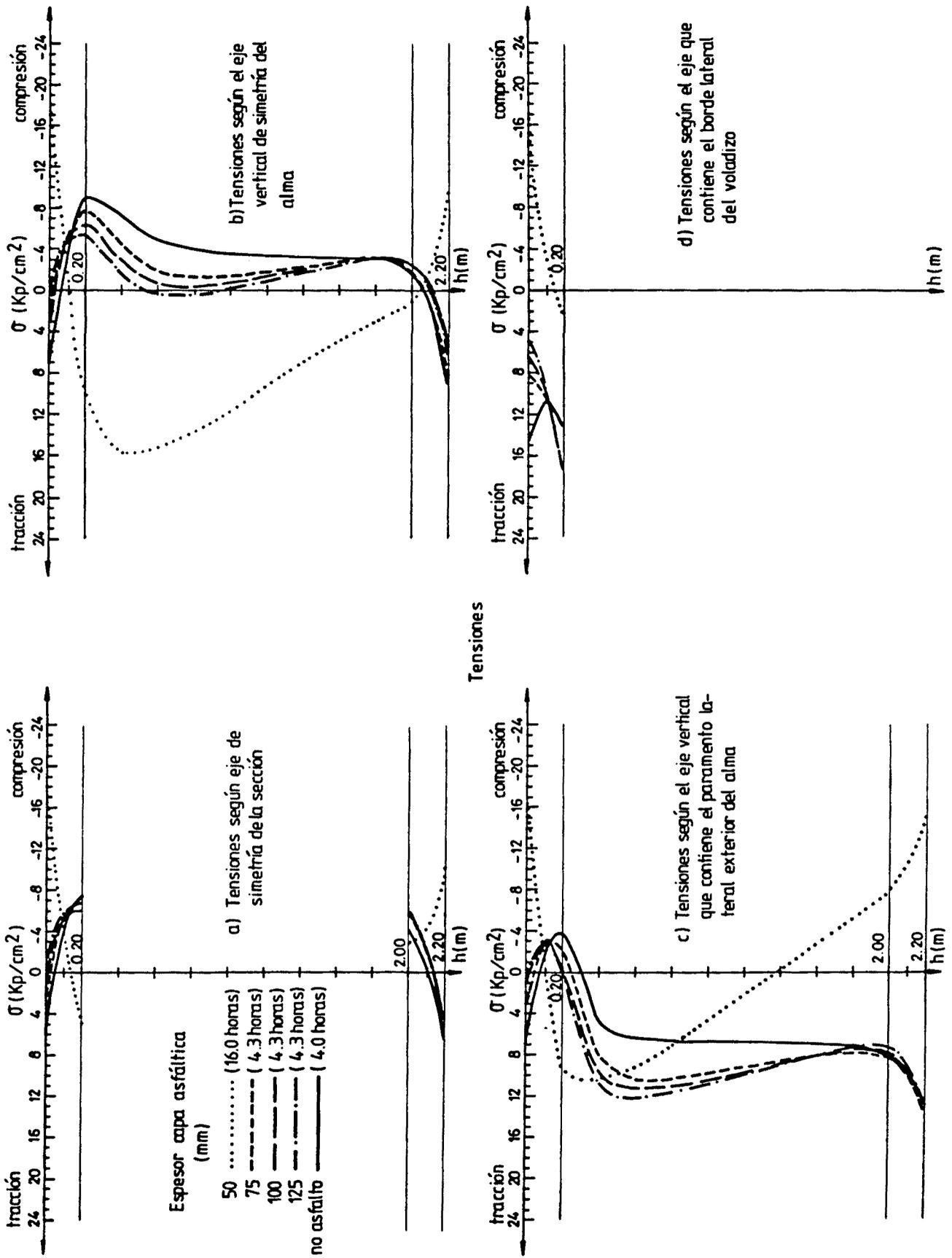


Fig. 3.55.- Tensiones autoequilibradas de tracción máxima correspondientes a diversos espesores de capa asfáltica, según diferentes ejes verticales.

En la citada figura 3.55 puede apreciarse de nuevo el hecho, ya comentado con anterioridad en el apartado 3.2, de que el puente cajón, en fase de calentamiento, muestra una respuesta térmica y tensional uniforme a lo ancho de la sección mientras que en fase de enfriamiento la respuesta térmica y tensional según diferentes ejes difiere notablemente entre sí.

En resumen, del presente estudio paramétrico se derivan las siguientes conclusiones:

- Cuanto menor es 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 máximos y los incrementos relativos de temperatura media.
- Se aprecia, al igual que ocurría en secciones transversales de losa maciza, un espesor umbral por encima del cual las magnitudes de las tensiones autoequilibradas y de las acciones térmicas impuestas son inferiores a las que corresponderían al puente cajón unicelular sin capa asfáltica. Hay que señalar, de nuevo, que dicho espesor umbral depende de las condiciones ambientales y climatológicas adoptadas en el análisis; no obstante, su rango de variación es, en general, pequeño. Para este estudio en particular el espesor umbral se encuentra próximo a los 10 cms.
- Se aprecian diferencias notables de temperatura entre el interior de la célula y el ambiente exterior. Tales diferencias, próximas a los 14°C, se acentúan algo más si se dispone capa asfáltica de rodadura.

Rango de variación diaria de la temperatura ambiente

El estudio paramétrico del rango de variación u oscilación térmica diaria de la temperatura ambiente se lleva a cabo para los siguientes valores de este parámetro: 30, 25, 20, 15, 10 y 5°C. Dichos valores cubren de forma amplia una variada climatología, desde un clima suave a un clima continental extremo.

Las figuras 3.56.a y 3.56.b muestran las distribuciones de temperaturas y tensiones correspondientes a cada uno de los valores que adopta el parámetro analizado en el instante en el que se generan las máximas curvaturas térmicas impuestas según el eje vertical de simetría de la sección (máximos gradientes verticales positivos).

De la observación de dichas figuras se desprende que cuanto mayor es el valor del rango de variación diaria de la temperatura ambiente mayores son las temperaturas en las fibras superior e inferior, manteniéndose prácticamente constante la temperatura en las fibras interiores. Así pues, a medida que aumenta el rango de la temperatura ambiente la no linealidad del campo de temperaturas es más acusada y, por consiguiente, mayor será la magnitud de las tensiones autoequilibradas.

Las figuras 3.57.a y 3.57.b muestran las evoluciones diarias del gradiente térmico vertical y de la temperatura media de la sección para los diferentes valores que adopta el parámetro analizado.

En dichas figuras puede apreciarse, por una parte, que tanto el gradiente térmico vertical como la temperatura media de la sección siguen una ley de tipo periódico y, por otra, que dichas funciones aumentan su rango de variación a medida que aumenta el rango de variación diaria de la temperatura ambiente.

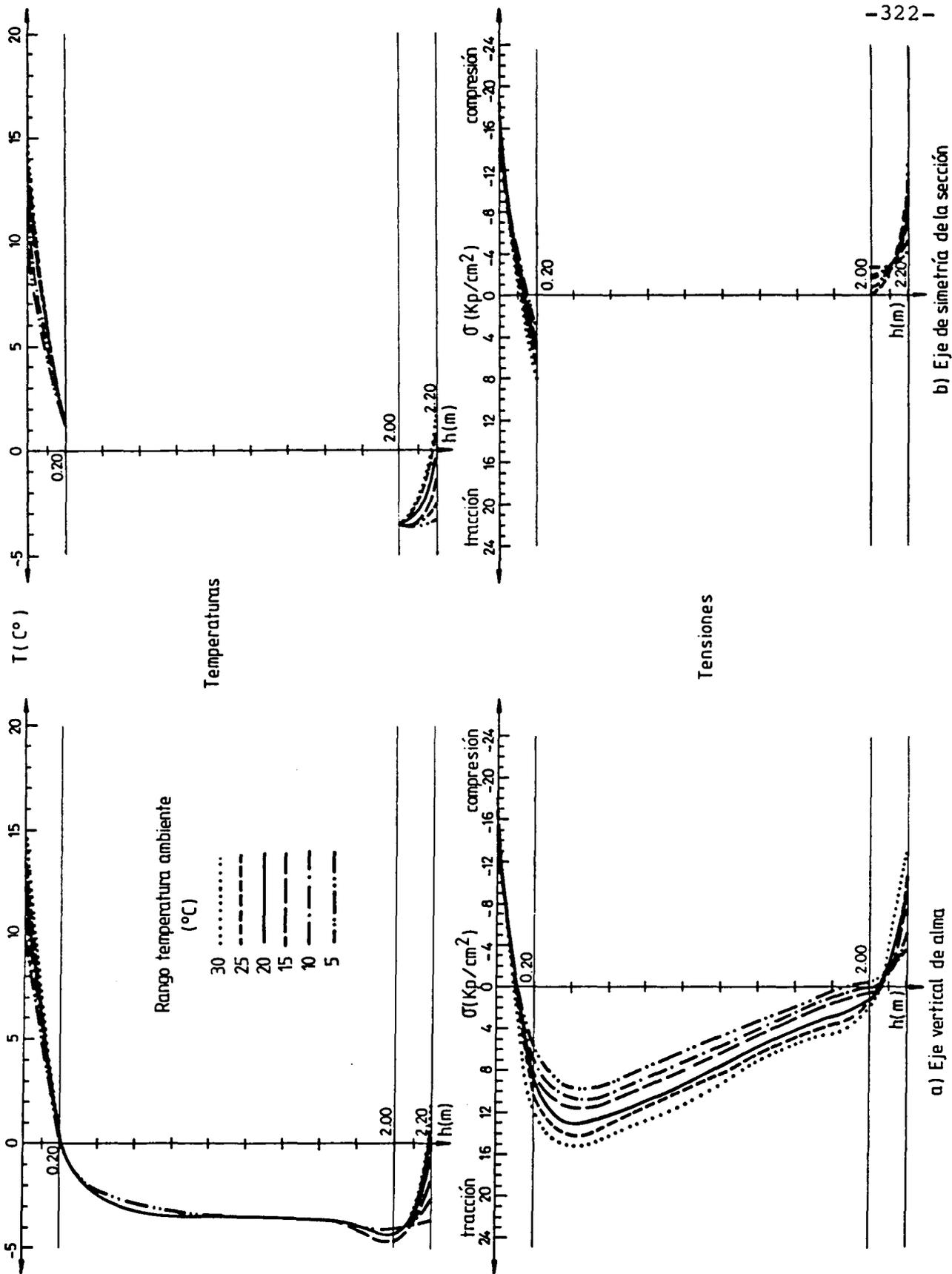
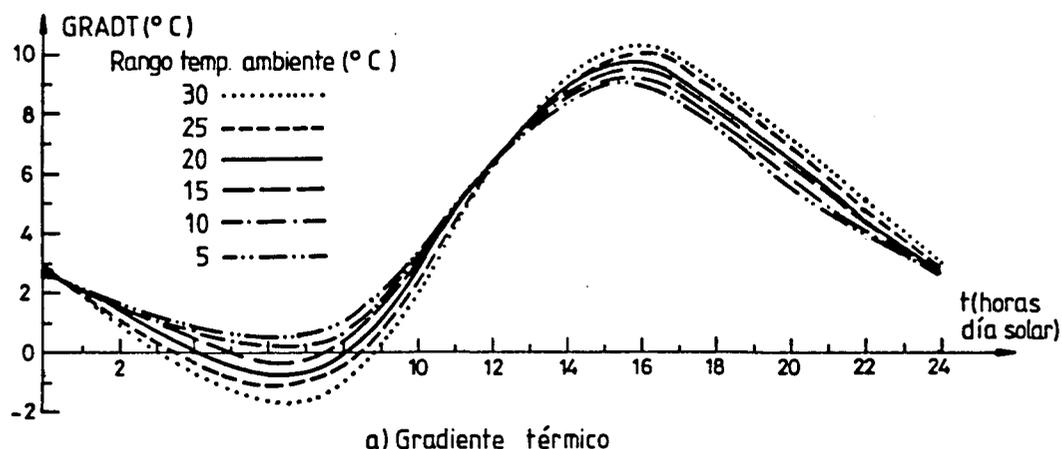
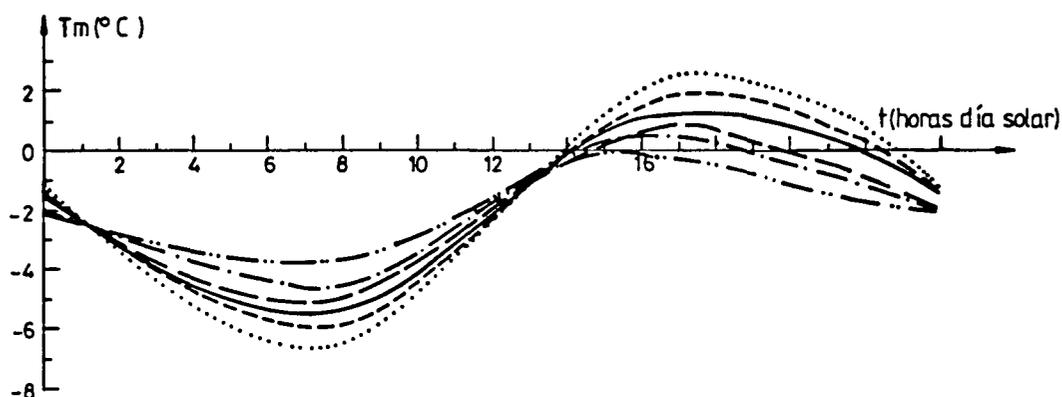


Fig. 3.56.- Distribuciones de temperaturas y tensiones en la sección cañón correspondientes a instantes de máximo gradiente térmico para diferentes rangos de variación diaria de temperatura ambiente.



a) Gradiente térmico



b) Temperatura media de la sección

Fig. 3.57.- Evolución diaria del gradiente térmico vertical y de la temperatura media de la sección para diferentes valores del rango de variación de la temperatura ambiente.

Los máximos gradientes térmicos tienen lugar en instantes próximos a las 16 horas mientras que los mínimos aparecen a primeras horas de la mañana, en torno a las 6 horas. La evolución de la temperatura media de la sección es similar a la del gradiente observándose, no obstante, un retraso temporal comprendido entre 1 y 2 horas en lo que se refiere a los instantes en que se alcanzan los máximos y mínimos de dicha función con respecto a los instantes en que se alcanzan los máximos y mínimos gradientes.

A continuación, la figura 3.58 muestra cómo evoluciona la temperatura en el interior de la célula a lo largo del día.

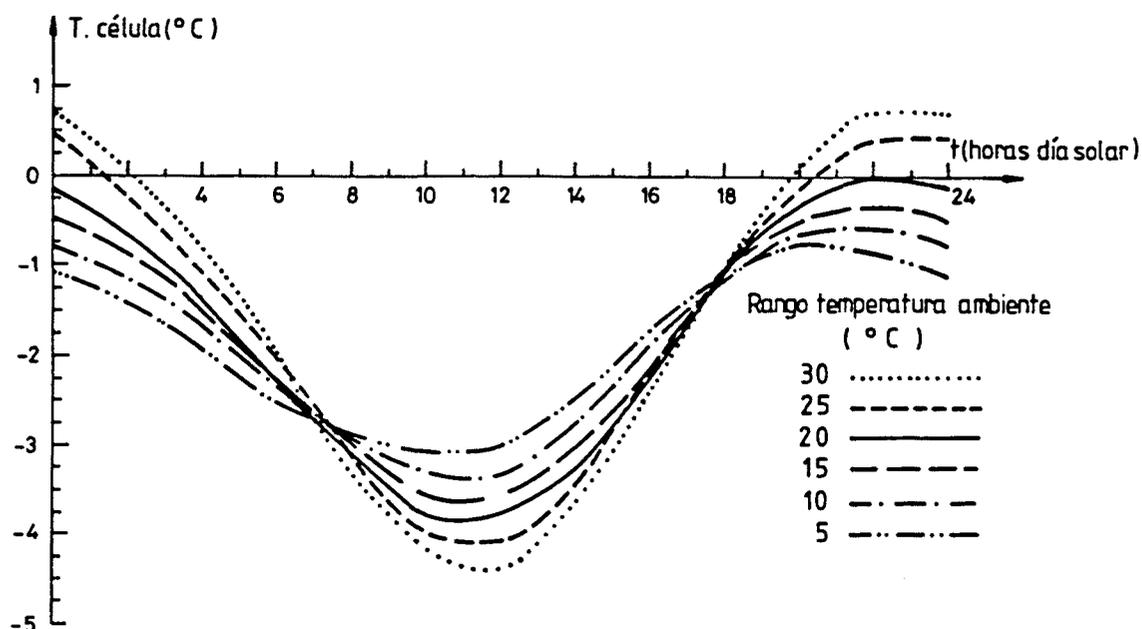


Fig. 3.58.- Evolución diaria de la temperatura en el interior de la célula para diferentes rangos de variación diaria de la temperatura ambiente.

La evolución de dicha temperatura, independientemente del valor adoptado por el parámetro analizado, es parecida a la de la temperatura media de la sección. No obstante, se aprecia de nuevo un desfase horario de los instantes en que se alcanzan los máximos y mínimos de la temperatura en el interior de la célula con respecto a los instantes de máximas y mínimas temperaturas medias de la sección. Dicho desfase se encuentra próximo a las 4 horas. Por otra parte, los rangos de variación diaria de la temperatura en el interior de la célula son menores que los de la temperatura media de la sección.

Las diferencias de temperaturas entre el interior de la célula y el ambiente exterior para los diversos valores adoptados por el rango de variación diaria de la temperatura ambiente se muestran en la figura 3.59. Como ya se ha comentado con anterioridad, dichas gráficas tienen interés cara a

la obtención de la sollicitación transversal por temperatura en puentes cajón.

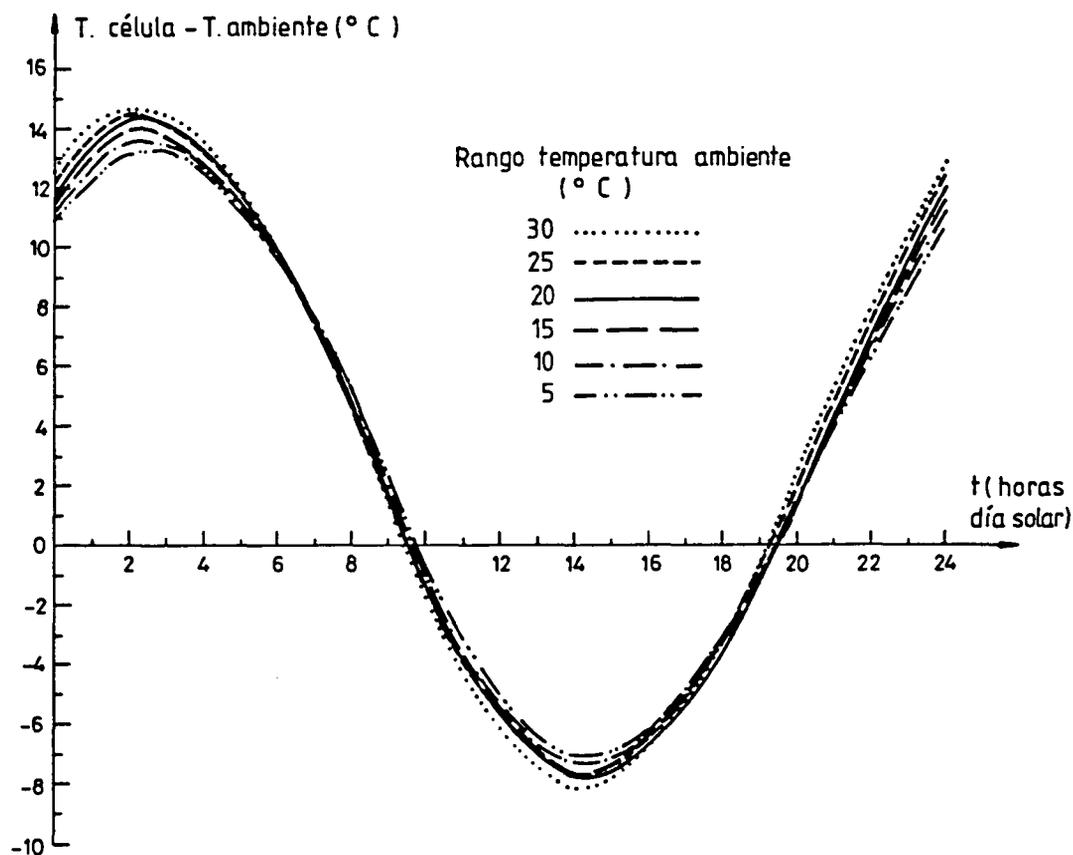


Fig. 3.59.- Evolución diaria de la diferencia de temperaturas entre el interior de la célula y el ambiente exterior para diferentes rangos de variación diaria de la temperatura ambiente.

En dichas gráficas se aprecian diferencias notables entre la temperatura en la célula y la temperatura ambiente. El rango de variación de tales diferencias es mayor cuanto más elevado es el rango de variación diaria de la temperatura en el exterior evidenciándose una relación directamente proporcional entre el valor del parámetro analizado y los máximos y mínimos de dicha función. Es decir, cuanto mayor es el rango de variación diaria de la temperatura ambiente mayor es la máxima diferencia de temperaturas entre el interior del cajón y el exterior.

Tales diferencias máximas suceden en instantes cercanos a las 2 horas de la madrugada, independientemente del valor adoptado por el parámetro, y pueden cifrarse, en general, en torno a un valor próximo a los 14°C. Este salto térmico puede originar tensiones de tracción considerables en las alas y almas que envuelven la célula, las cuales deberían ser tenidas en cuenta en el diseño.

Las figuras 3.60.a y 3.60.b muestran, respectivamente, la influencia del rango de variación diaria de la temperatura ambiente sobre los máximos gradientes térmicos verticales e incrementos relativos de temperatura media de la sección.

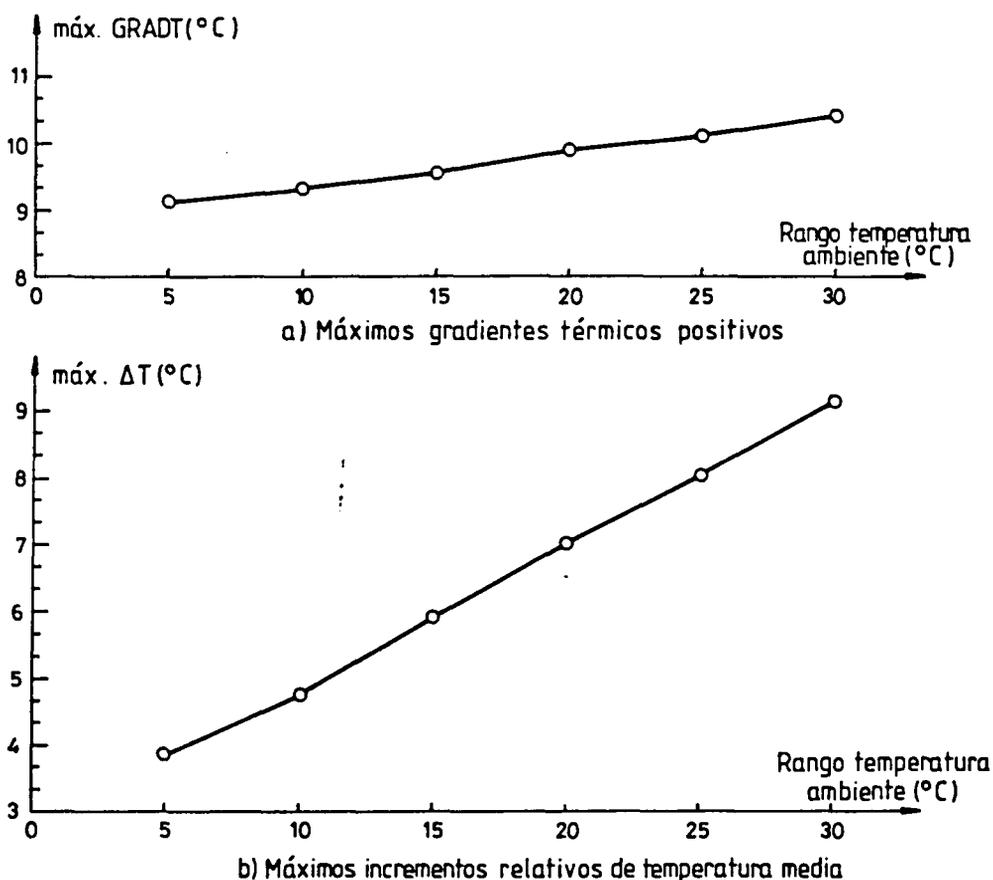


Fig. 3.60.- Influencia del rango de variación de la temperatura ambiente sobre los gradientes máximos e incrementos relativos de temperatura media de la sección.

En ambas figuras puede apreciarse que cuanto mayor es la oscilación diaria de la temperatura ambiente mayores son las acciones térmicas impuestas máximas, evidenciándose una clara relación directamente proporcional.

Por otra parte, los gradientes térmicos transversales son despreciables alcanzándose un valor máximo del orden de 0.6°C , independientemente del valor adoptado por el parámetro analizado. Dichos máximos aparecen en instantes muy próximos a los instantes en los que se alcanzan los máximos gradientes térmicos verticales.

Por último, la figura 3.61 refleja, según diversos ejes verticales, las distribuciones de tensiones longitudinales autoequilibradas correspondientes a los instantes en los que se induce la máxima tracción en el hormigón para cada valor del rango de la temperatura ambiente.

Al igual que ocurría en puentes losa maciza, existen dos instantes del día para los cuales se alcanzan las tracciones máximas. El primero de ellos tiene lugar a primeras horas del día, próximo a las 4 horas, apareciendo las tracciones máximas en las fibras superior e inferior de la sección y, en particular, en los voladizos. El segundo instante acaece en horas comprendidas entre el mediodía solar y el instante para el cual se induce la máxima curvatura térmica vertical impuesta. En este caso, la zona o fibras que se ven sometidas a mayores tracciones son las fibras intermedias y, en concreto, las fibras situadas en el tercio superior de las almas de la sección en cajón.

A la vista de los resultados obtenidos puede decirse que las fibras más solicitadas a tracción son las esquinas, los bordes laterales de ambos voladizos y la zona de almas próxima a la unión de éstas con el ala superior del cajón. Por otra parte, puede observarse que a medida que aumenta el rango de variación diaria de la temperatura ambiente las tracciones máximas alcanzadas por cualquier fibra de la sección van en aumento.

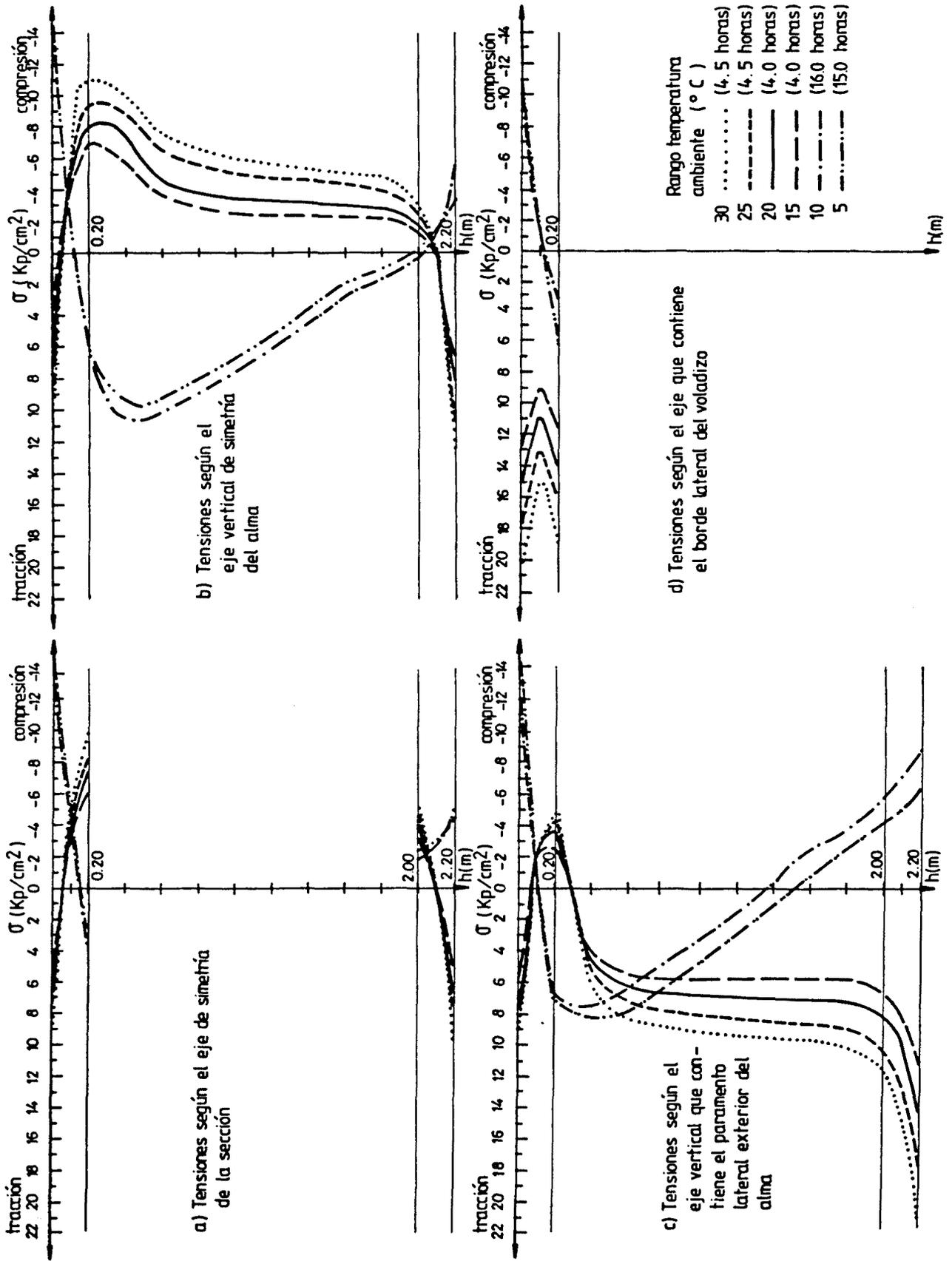


Fig. 3.61.- Distribuciones de tensiones autoequilibradas correspondientes al instante en que se genera la máxima tracción, para diferentes rangos de temperatura ambiente.

Resumiendo, del análisis de los resultados obtenidos en el estudio paramétrico se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Cuanto mayor es el rango de variación diaria de la temperatura ambiente más acusada es la no linealidad del campo de temperaturas y, por lo tanto, mayores son las tensiones internas autoequilibradas.
- Asimismo, cuanto mayor es el rango de variación de la temperatura ambiente mayores son los gradientes térmicos máximos y los incrementos relativos de temperatura media de la sección.
- Existen diferencias apreciables entre la temperatura en el interior de la célula y la temperatura ambiente en el exterior. Dichas diferencias varían de forma directamente proporcional, aunque muy leve, con el valor del parámetro y su máximo se mueve, de nuevo, en torno a los 14°C.

Velocidad del viento

Como ya se ha comentado con anterioridad al analizar la respuesta térmica de los puentes losa maciza, este parámetro influye en el fenómeno de la transmisión de calor a través de los valores que adopta el coeficiente de transferencia de calor por convección para las diferentes superficies expuestas. Los coeficientes propuestos por Kehlbeck (53) son los que se utilizarán en el presente estudio paramétrico (tabla 3.4).

Las velocidades de viento a considerar son 1, 3, 5, 7 y 9 m/seg. Estas se consideran velocidades medias a lo largo del día analizado y reflejan, con suficiente aproximación, la situación en la que se encuentra inmerso el puente en lo que se refiere a la incidencia de esta variable climatológica.

Las figuras 3.62.a y 3.62.b muestran las distribuciones térmicas y tensionales correspondientes a los instantes en que, para cada uno de los valores asignados a la velocidad del viento, se generan las máximas curvaturas térmicas verticales impuestas, o lo que es lo mismo, los máximos gradientes verticales.

En dichas figuras, puede apreciarse que la temperatura en la fibra superior de la sección cajón desciende a medida que aumenta la velocidad del viento al ser mayores las pérdidas de calor por convección. Las distribuciones de temperaturas son sensiblemente diferentes entre sí debido a que la temperatura en las fibras intermedias disminuye de forma clara al aumentar la velocidad del viento. Pese a ello, las distribuciones tensionales son muy similares, independientemente del valor adoptado por el parámetro.

En las figuras 3.63.a y 3.63.b se muestra la evolución diaria del gradiente térmico vertical y de la temperatura media de la sección para las diferentes velocidades de viento.

En éstas se aprecia la evolución periódica de ambas funciones y el desfase horario existente entre los máximos gradientes y las máximas temperaturas medias.

La oscilación diaria del gradiente térmico es mayor a medida que disminuye la velocidad del viento. Puede observarse también que a mayor velocidad de viento el puente es más susceptible de verse sometido a gradientes térmicos verticales inversos.

En cuanto a la evolución diaria de la temperatura media de la sección puede apreciarse que, cuanto mayor es la velocidad del viento, la temperatura media de la sección, para cualquier instante del día, se hace menor aumentando su rango de variación debido a la inercia térmica que introduce la existencia de aire en la célula, el cual no se ve afectado por el fenómeno de convección.

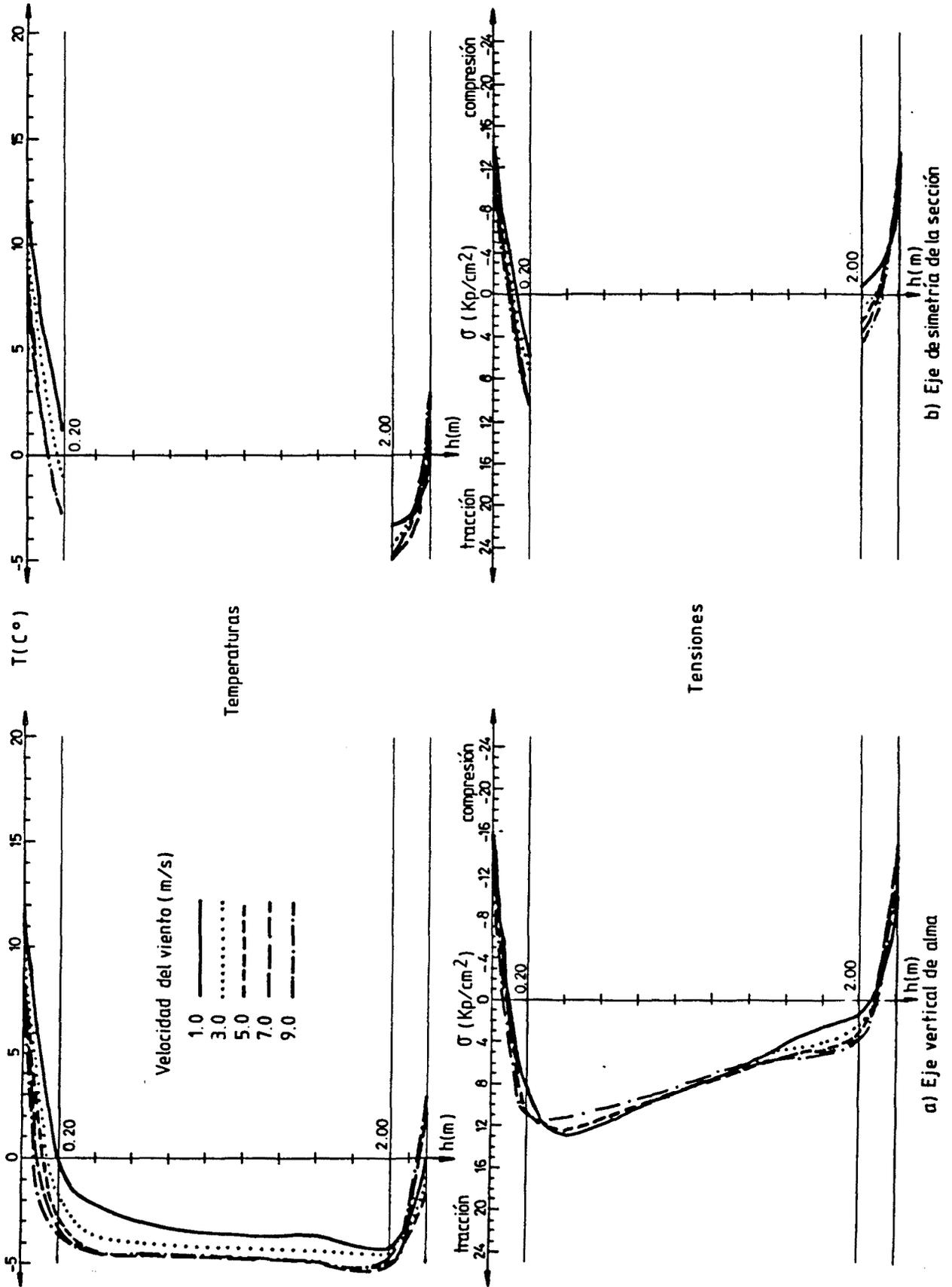


Fig. 3.62.- Distribuciones de temperaturas y tensiones en la sección cañón, correspondientes a instantes de máximos gradientes térmicos para diferentes velocidades de viento.

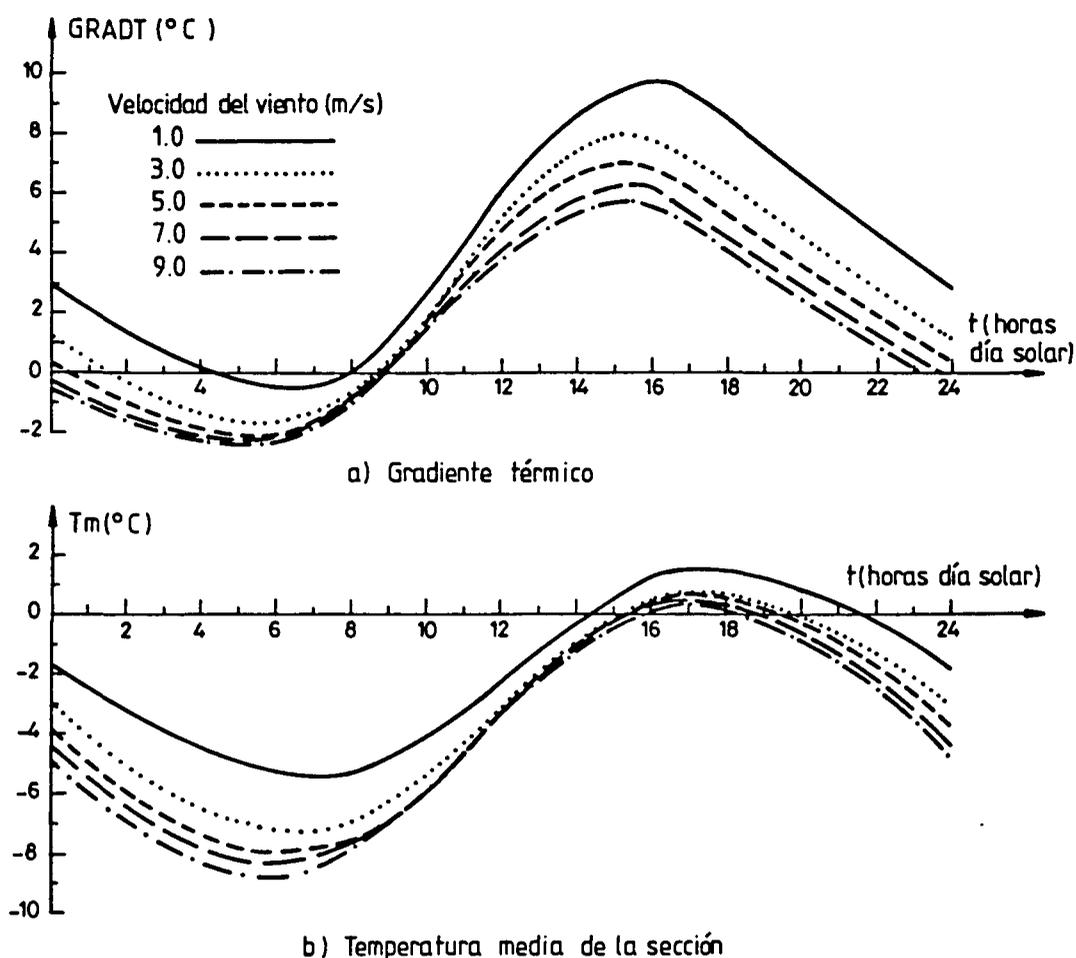


Fig. 3.63.- Evolución diaria del gradiente térmico y de la temperatura media de la sección para diferentes velocidades de viento.

La evolución de la temperatura en el interior de la célula a lo largo del día queda reflejada en la figura 3.64 pudiendo observarse un desfase temporal con respecto a la evolución de la temperatura media de la sección de aproximadamente 4 horas.

Las diferencias de temperatura entre el interior de la célula y el exterior y su evolución diaria para las diferentes velocidades de viento adoptadas en el estudio paramétrico se presentan en la figura 3.65.

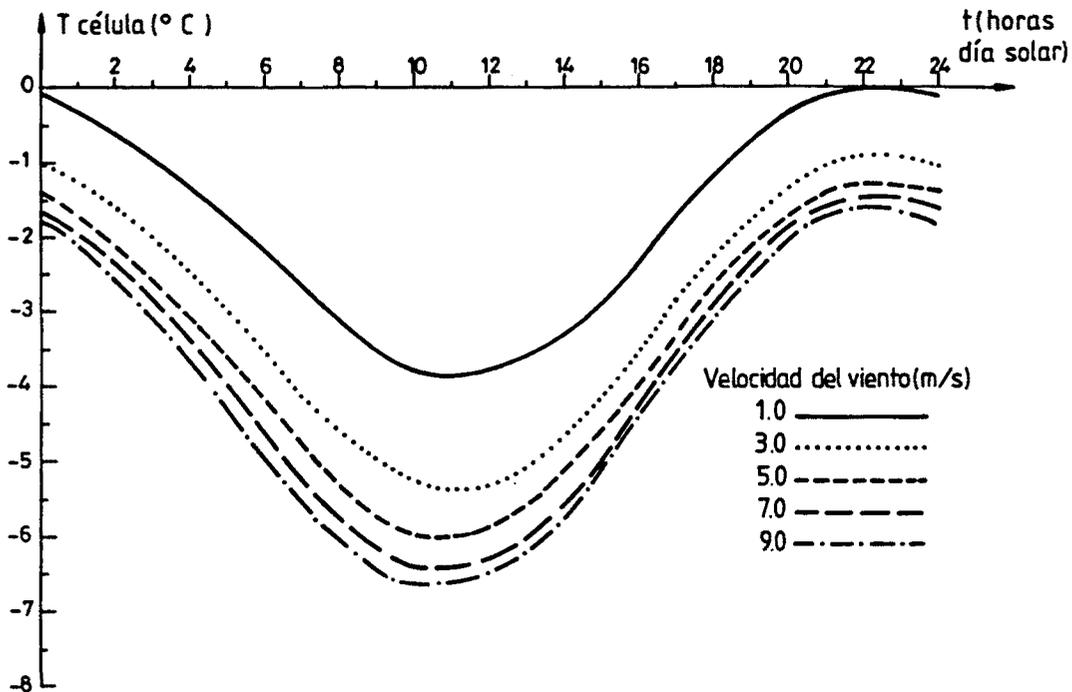


Fig. 3.64.- Evolución diaria de la temperatura en el interior de la célula para diferentes velocidades de viento.

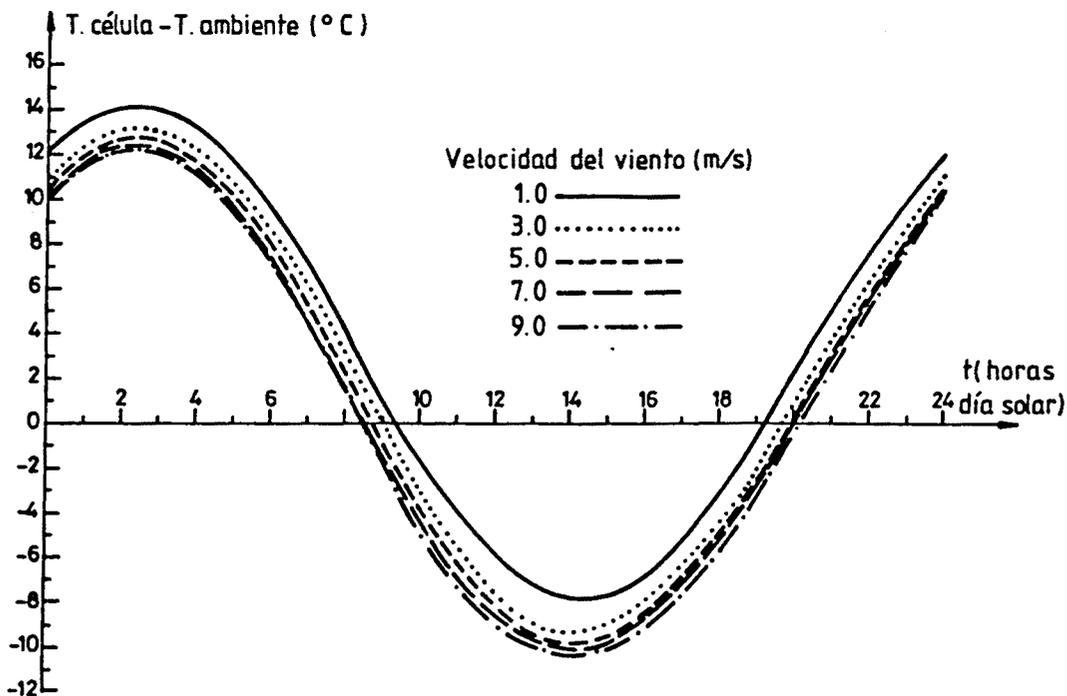


Fig. 3.65.- Evolución diaria de la diferencia de temperaturas entre el interior de la célula y el ambiente exterior para diferentes velocidades de viento.

En dicha figura pueden apreciarse notables diferencias de temperatura entre el interior de la célula y el ambiente exterior. El rango de variación diaria de tales diferencias permanece constante independientemente del valor adoptado por el parámetro y se mueve en torno a un valor total aproximado de 22°C. Puede observarse que las máximas diferencias positivas (la temperatura del aire de la célula es mayor que la temperatura ambiente) tienen lugar a las 2 horas de la madrugada disminuyendo ligeramente de valor a medida que aumenta la velocidad del viento mientras que las máximas diferencias negativas (la temperatura del aire de la célula es menor que la temperatura ambiente) ocurren a las 14 horas aumentando, de forma ligera, al aumentar la velocidad del viento.

En ambos casos, las diferencias de temperatura existentes no son despreciables y pueden originar tensiones transversales de cierta consideración en las fibras exteriores de las alas y almas, ya se encuentren aquéllas en contacto con el ambiente exterior o en contacto con el aire de la célula. Obsérvese que dichas diferencias alcanzan valores próximos a los 13°C y a los -9°C.

Las figuras 3.66.a y 3.66.b reflejan la influencia de la velocidad del viento sobre los máximos gradientes verticales e incrementos relativos de temperatura media de la sección respectivamente.

En lo que se refiere a la influencia del parámetro sobre los máximos gradientes térmicos, puede apreciarse que a medida que aumenta la velocidad del viento dichos máximos van disminuyendo. Sin embargo, en la gráfica 3.66.b correspondiente a los incrementos relativos de temperatura media de la sección, puede apreciarse que éstos son mayores cuanto más elevada es la velocidad del viento. Dicho comportamiento, diametralmente opuesto al observado en puentes losa maciza, es debido al hecho de que la velocidad del viento influye únicamente en los coeficientes de transferencia de calor por convec-

ción de las superficies externas mientras que en las internas -superficies en contacto con el aire encerrado en la célula- el coeficiente de convección permanece constante e independiente del valor adoptado por el parámetro.

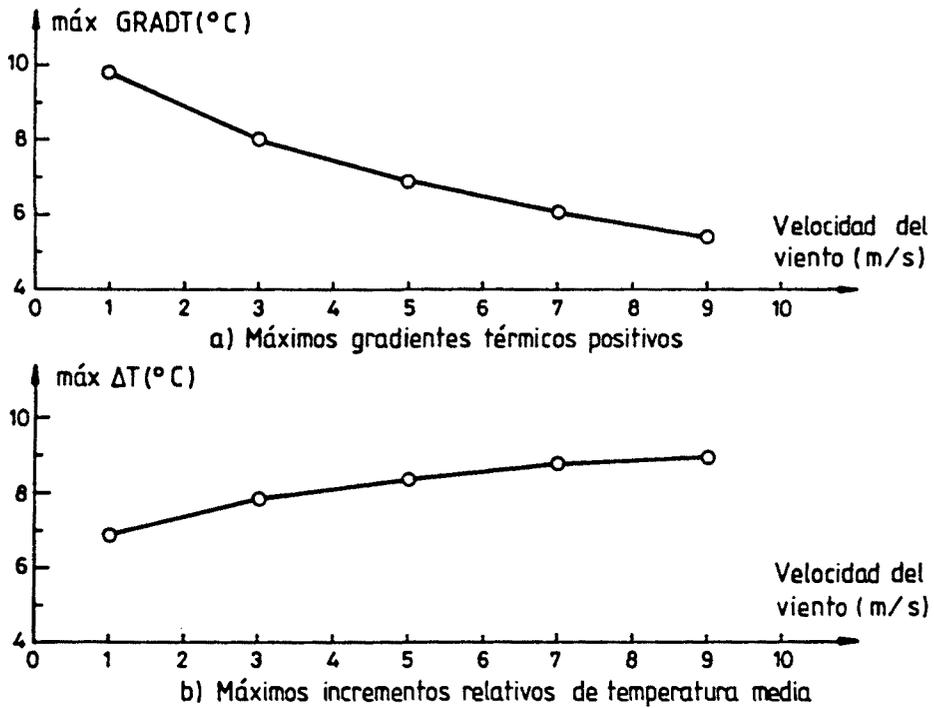


Fig. 3.66.- Influencia de la velocidad del viento sobre los gradientes máximos e incrementos relativos de temperatura media de la sección.

En cuanto a los gradientes térmicos transversales puede decirse que éstos alcanzan magnitudes muy poco significativas, no sobrepasándose en ningún caso 0.6°C . No obstante, puede apreciarse una relación inversamente proporcional entre el gradiente térmico transversal máximo y la velocidad del viento.

La figura 3.67 muestra, según diversos ejes verticales, las distribuciones de tensiones longitudinales equilibradas correspondientes a los instantes en que, para cada uno de los valores adoptados por el parámetro, se alcanza la máxima tensión de tracción en el hormigón.

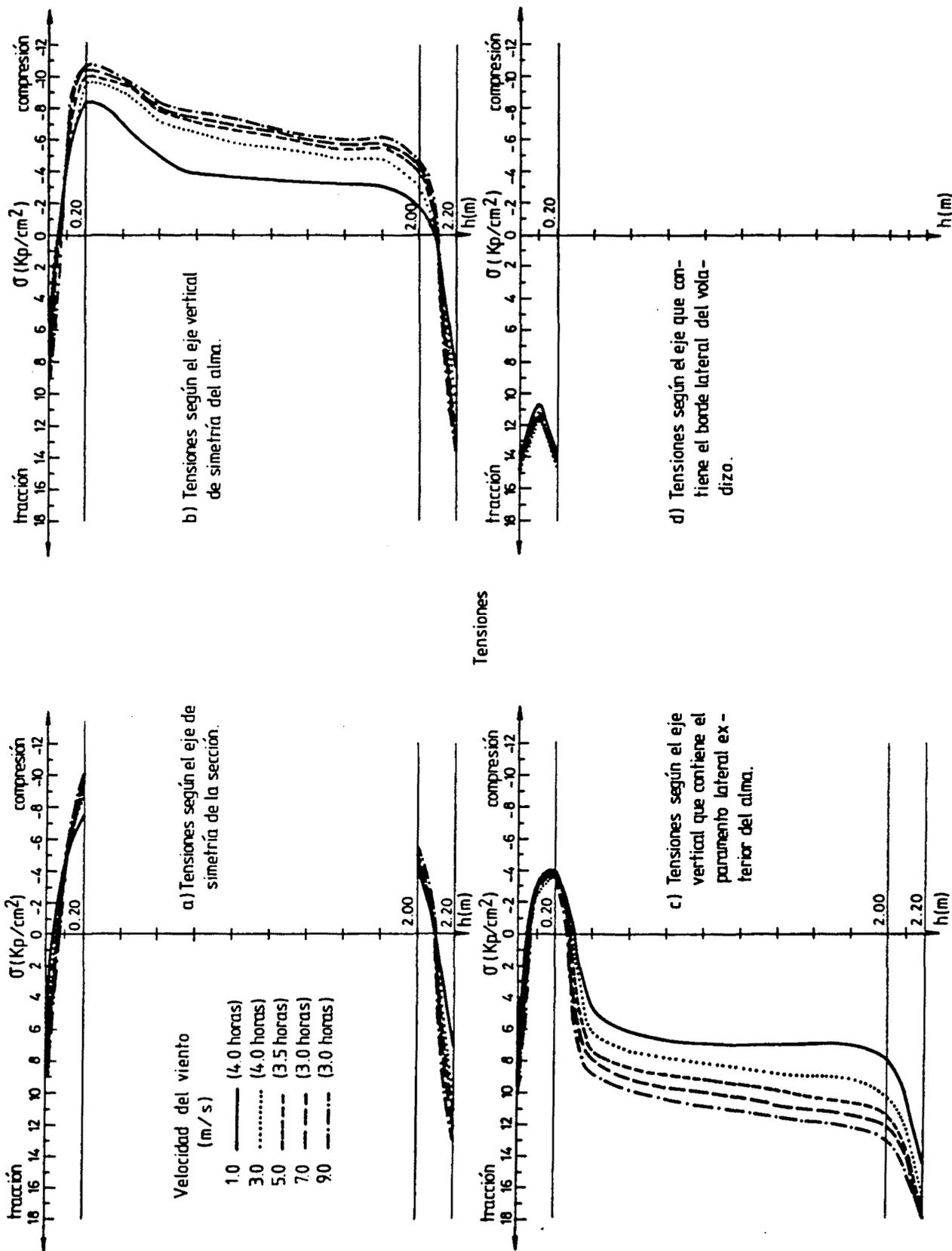


Fig. 3.67.- Distribuciones de tensiones autoequilibradas correspondientes al instante en el que se genera la máxima tracción, para diferentes velocidades de viento.

Como puede verse en dichas figuras, las tensiones máximas de tracción se alcanzan a primeras horas de la mañana, comprendidas entre las 3 horas y 4 horas, siendo las fibras solicitadas por tales tracciones las esquinas, bordes laterales de los voladizos y paramentos laterales de la sección. En períodos de tiempo comprendidos entre el mediodía solar y el instante en el que se inducen las máximas curvaturas térmicas las tracciones máximas aparecen en el tercio superior de las almas del cajón, en la zona de unión ala-alma (figura 3.62).

También puede observarse que, contrariamente a lo señalado en el estudio de puentes losa, las distribuciones de tensiones correspondientes al instante en el que se genera la máxima tensión de tracción en el hormigón presentan una no linealidad algo más acusada y son de mayor magnitud a medida que aumenta la velocidad del viento. Ello es debido a la presencia del aire de la célula y a la constancia del coeficiente de convección de las superficies internas en contacto con dicho aire.

El análisis de los resultados del presente estudio paramétrico permite extraer algunas conclusiones:

- En general las distribuciones de tensiones autoequilibradas son similares entre sí independientemente del valor adoptado por la velocidad del viento si bien puede observarse que, en los instantes para los que se genera la máxima tensión de tracción en el hormigón, a medida que aumenta el valor de dicho parámetro aumenta ligeramente la magnitud de las tensiones autoequilibradas.
- Cuanto menor es la velocidad del viento mayor es el gradiente térmico vertical máximo alcanzado por la sección.
- Cuanto mayor es la velocidad del viento mayor es el incremento relativo diario de temperatura media de

la sección -expansión eficaz diaria del puente-. Dicho comportamiento es debido al hecho de que el coeficiente de transferencia de calor por convección en las superficies internas en contacto con el aire de la célula se mantiene constante e independiente del parámetro analizado.

- Aparecen de nuevo diferencias notables de temperatura entre el aire de la célula y el ambiente exterior, tanto en un sentido como en el otro. Los máximos de dichas diferencias se encuentran próximos a los 13°C y -10°C .

Factor de turbidez

El factor de turbidez contempla la influencia que la presencia de nubosidad y polución atmosférica en la zona de emplazamiento del puente ejerce sobre la intensidad de radiación solar incidente y, por consiguiente, sobre la distribución de temperaturas a través de la sección a analizar. En este estudio paramétrico se han adoptado para este factor los valores de 1.8, 3.0, 5.0, 7.0 y 9.0 cubriéndose, de esta forma, desde ambientes puros con cielo claro a ambientes pesados e industriales.

A continuación, en la figura 3.68 se presentan las distribuciones de temperaturas y tensiones correspondientes a los instantes en los que se inducen los máximos gradientes térmicos verticales para cada uno de los valores del factor de turbidez.

En dicha figura puede observarse que las distribuciones de temperatura, en el instante de máximo gradiente, correspondientes a valores bajos del factor de turbidez muestran una no linealidad más acusada que las correspondientes a altos valores del parámetro.

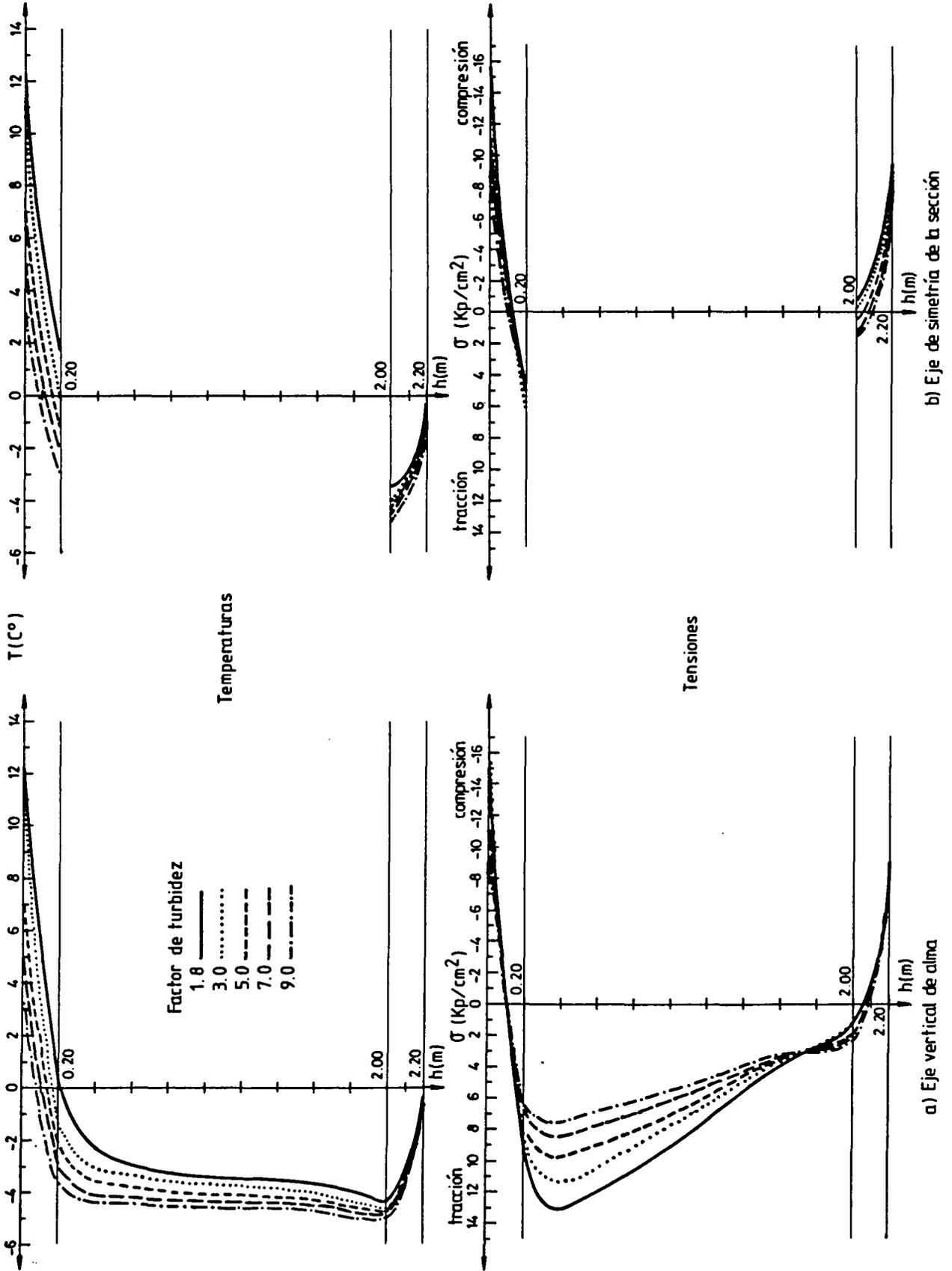


Fig. 3.68.- Distribuciones de temperaturas y tensiones en la sección cajón correspondientes a instantes de máximo gradiente térmico para diversos factores de turbidez.

La temperatura de la fibra superior de la sección a medida que aumenta el factor de turbidez, disminuye de forma notoria mientras que la temperatura de las fibras intermedias también desciende pero de forma muy leve. Ello hace que la magnitud de las tensiones autoequilibradas sea mayor cuanto menor sea el factor de turbidez.

Las figuras 3.69.a y 3.69.b muestran respectivamente la evolución diaria del gradiente térmico vertical y la de la temperatura media de la sección para diferentes valores del factor de turbidez.

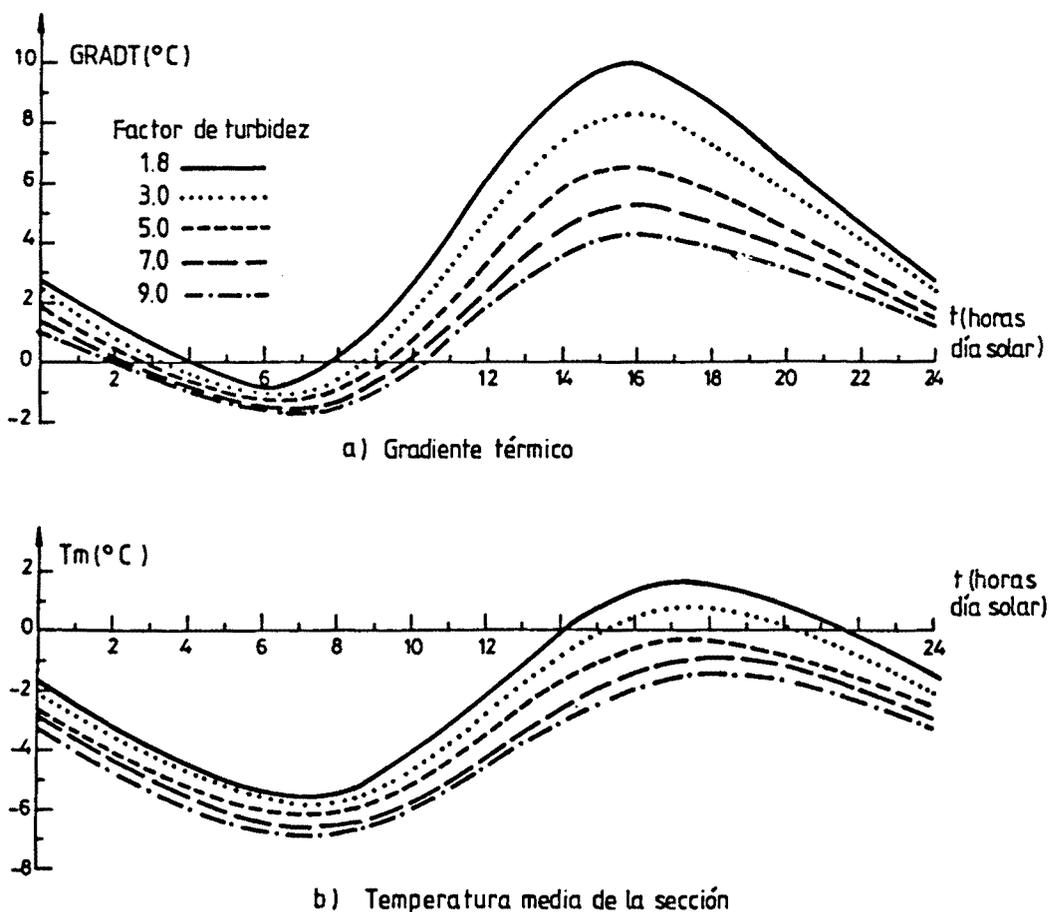


Fig. 3.69.- Evolución diaria del gradiente térmico y de la temperatura media de la sección para diferentes valores del factor de turbidez.

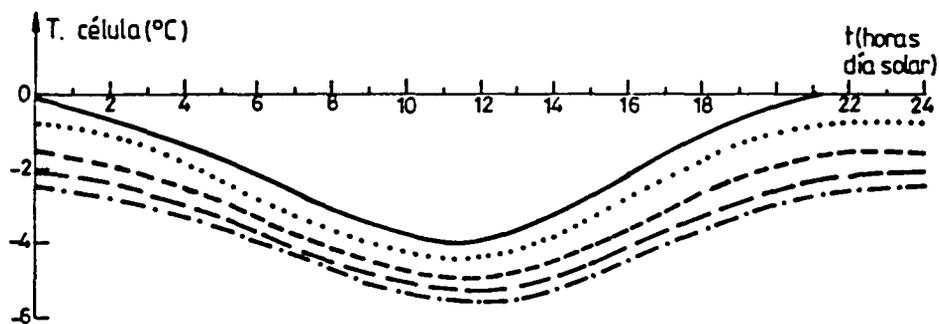
Ambas funciones evolucionan a lo largo del día de forma periódica y puede apreciarse de nuevo el desfase horario existente entre los instantes para los cuales se generan los mínimos y máximos de los gradientes térmicos y de las temperaturas medias de la sección cajón. Por otra parte puede observarse que a medida que aumenta el factor de turbidez menores son las oscilaciones o rangos de variación diaria de dichas funciones.

Las evoluciones diarias de la temperatura del aire de la célula y de la diferencia de temperaturas entre el interior de la célula y el ambiente exterior para los diferentes valores adoptados por el factor de turbidez pueden contemplarse en las figuras 3.70.a y 3.70.b respectivamente.

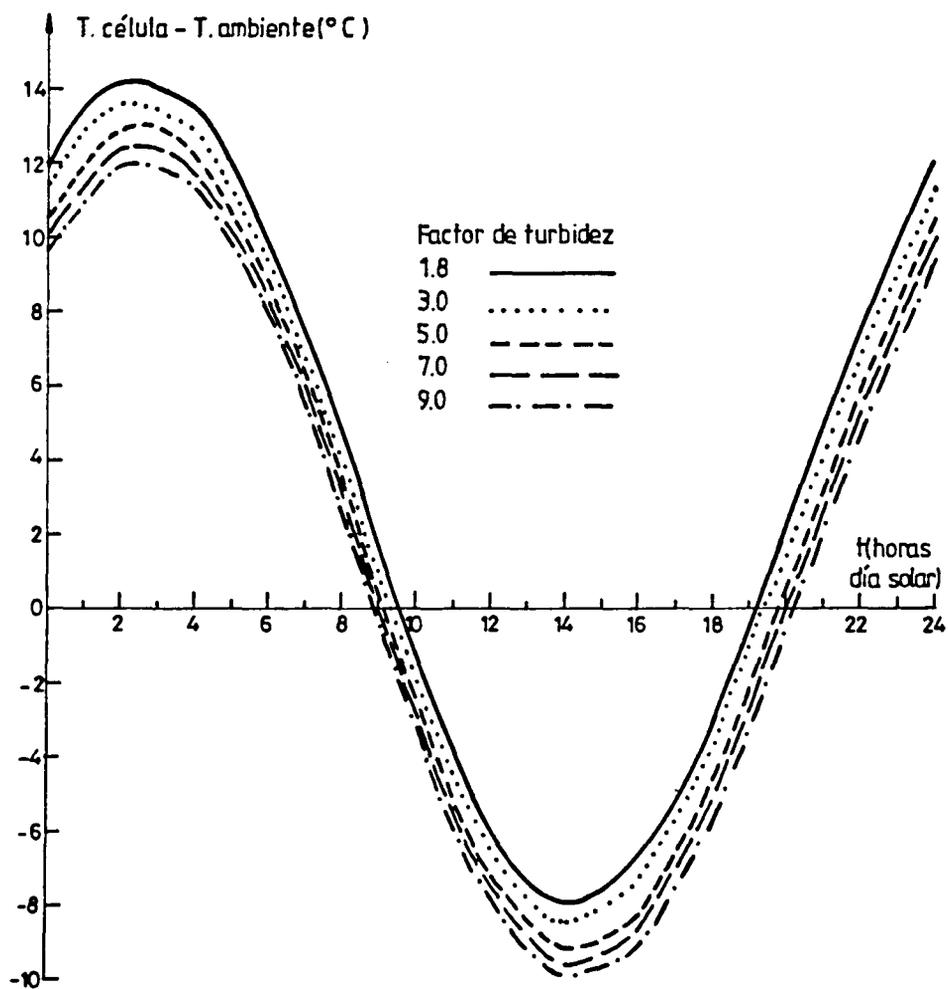
En la primera de ellas puede apreciarse el siempre existente desfase temporal de la evolución de la temperatura en el interior de la célula con respecto a la de la temperatura media de la sección. En cuanto a la evolución diaria de las diferencias de temperatura entre el interior de la célula de la sección cajón y el ambiente exterior se observa que aquéllas son considerables, en torno a los 13°C y -9°C , dependiendo del instante o período de tiempo en el que se evalúen dichas diferencias (en fase de descenso o de aumento de la temperatura ambiente exterior).

Las figuras 3.71.a y 3.71.b muestran la influencia del parámetro analizado sobre los gradientes térmicos máximos y sobre los incrementos relativos de temperatura media de la sección cajón respectivamente.

En ellas puede apreciarse que cuanto menor es el factor de turbidez mayores son los gradientes térmicos verticales máximos alcanzados y mayores son también los incrementos relativos de temperatura media de la sección.



a) Temperatura en la célula



b) Diferencias de temperaturas entre el interior de la célula y el exterior

Fig. 3.70.- Evolución diaria de la temperatura del aire de la célula y de la diferencia de temperaturas entre ésta y el ambiente exterior para diferentes valores del factor de turbidez.

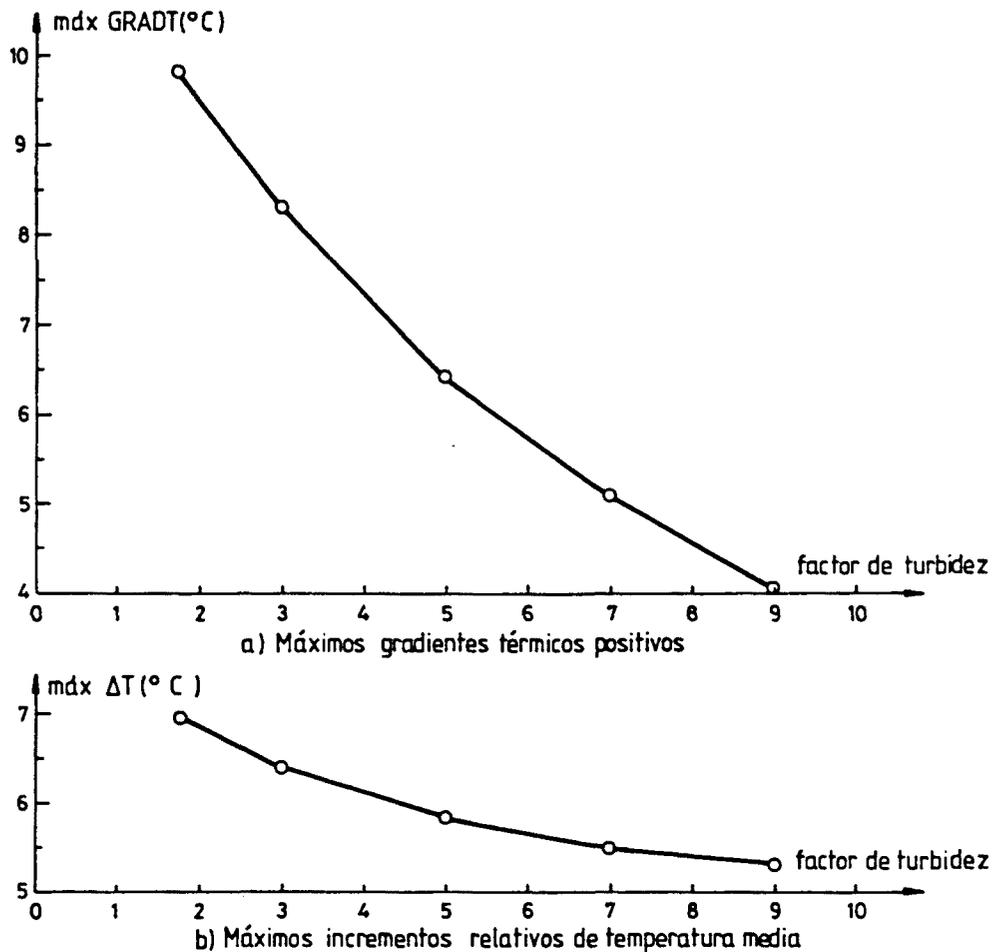


Fig. 3.71.- Influencia del factor de turbidez sobre los gradientes máximos e incrementos relativos de temperatura media de la sección cajón.

Por otra parte, los gradientes térmicos transversales máximos, los cuales acaecen en períodos de tiempo comprendidos entre el mediodía solar y el instante para el cual se generan los máximos gradientes verticales, también muestran una ligera relación inversamente proporcional con el factor de turbidez. No obstante, los valores alcanzados por dichos máximos son, en cualquier caso, muy poco significativos no superándose gradientes de 0.6°C .

La figura 3.72 muestra las distribuciones de tensiones longitudinales autoequilibradas correspondientes a los instantes en los que, para cada valor del factor de turbidez, se genera la máxima tensión de tracción en el hormigón.

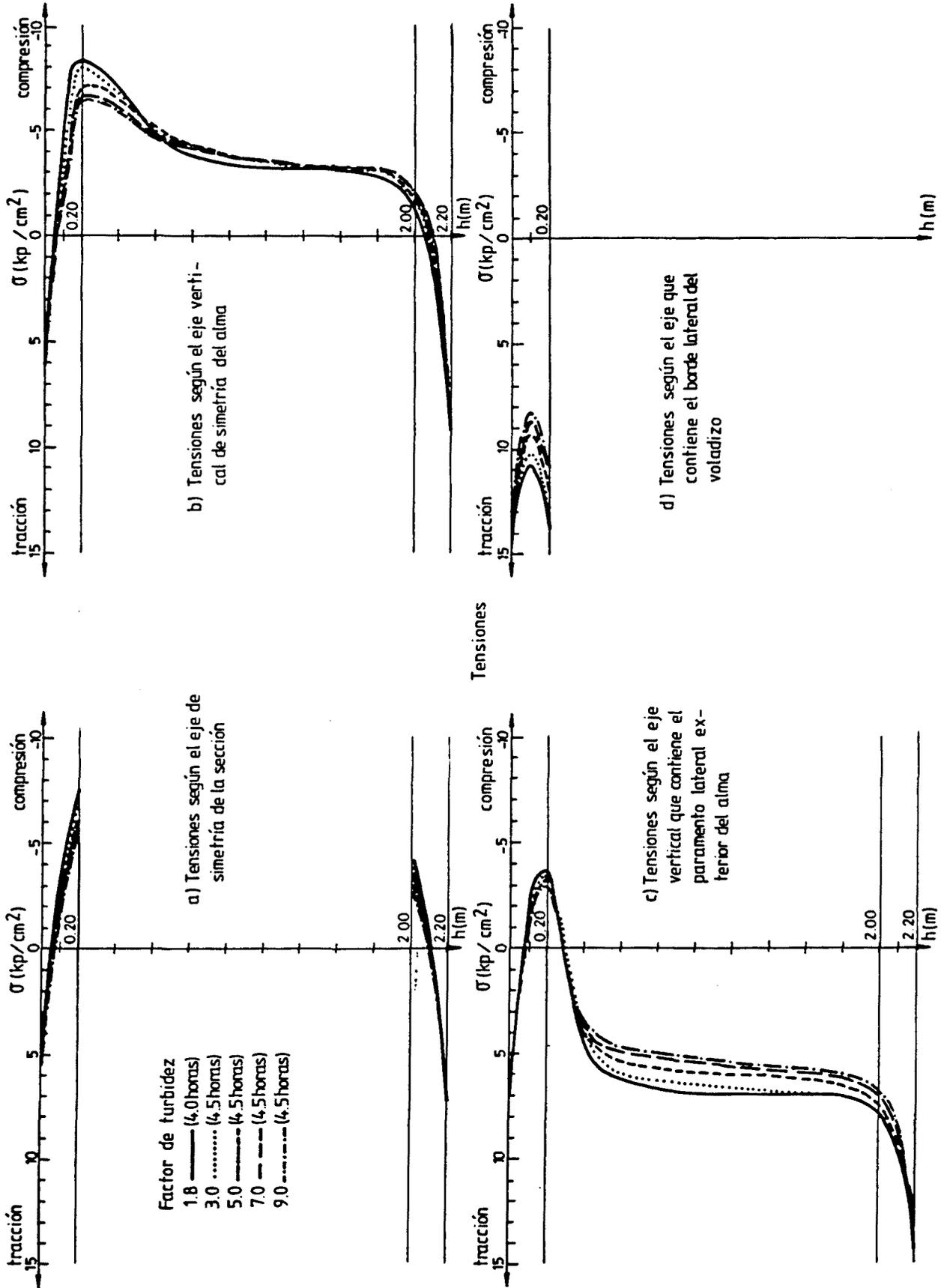


Fig. 3.72.- Distribuciones de tensiones autoequilibradas correspondientes al instante en el que se genera la máxima tracción para diferentes valores del factor de turbidez.

Dichas distribuciones se presentan según diversos ejes verticales para poder visualizar la diferente respuesta térmica y tensional a través del ancho de la sección.

Como puede observarse en dicha figura las tensiones longitudinales autoequilibradas correspondientes a valores bajos del factor de turbidez son de mayor magnitud que las que corresponden a valores altos. De nuevo se observan dos instantes del día para los cuales se inducen las más elevadas tensiones de tracción. En el presente estudio paramétrico e, independientemente del valor adoptado por el factor turbidez, la tensión máxima de tracción en el hormigón se genera entre las 4 horas y 5 horas de la mañana, siendo las zonas más solicitadas las fibras superior e inferior de la sección, los paramentos laterales y los bordes laterales de los voladizos. Sin embargo, hay que tener presente que en instantes próximos y posteriores al mediodía solar se inducen tensiones de tracción de cierta magnitud en la zona de unión ala superior-alma (figura 3.68).

Del análisis de los resultados obtenidos en el estudio paramétrico de este factor se desprenden las siguientes conclusiones relativas a la magnitud de las tensiones térmicas y de las acciones térmicas:

- Cuanto menor es el factor de turbidez más acusada es la no linealidad de la distribución de temperaturas y, por lo tanto, mayor es la magnitud de las tensiones autoequilibradas longitudinales.
- Cuanto menor es el factor de turbidez mayores son los rangos de variación diaria del gradiente y mayores son también los gradientes térmicos verticales máximos y los incrementos relativos de temperatura media de la sección.
- Se aprecian diferencias notables entre la temperatura del aire de la célula y la temperatura ambien

te exterior. Los máximos de dichas diferencias se mueven en torno a los 13°C y -9°C y ocurren en instantes donde la temperatura ambiente exterior alcanza su mínimo -entre las 2 horas y 3 horas- o alcanza su máximo -entre las 14 horas y 15 horas- respectivamente.

Día del año

La influencia de este factor o condición de contorno queda reflejada de forma patente en el valor que adquiere la intensidad de radiación solar incidente sobre el tablero y paramentos laterales de la sección, la inclinación de los rayos solares y la duración del día solar.

El consiguiente estudio paramétrico se ha llevado a cabo para cada uno de los meses del año adoptando como día representativo de cada mes un día medio, que puede definirse como aquel día para el cual la radiación solar extraterrestre posee el valor más próximo a la radiación solar extraterrestre diaria, obtenida ésta última como media mensual para el mes considerado (Coronas et al. (25)). En la tabla 3.5 del apartado 3.2 pueden encontrarse dichos días medios y sus correspondientes declinaciones solares.

Por otra parte, para que el estudio paramétrico del día del año tenga un sentido físico real, deben adoptarse unos valores de la temperatura ambiente acordes con el mes analizado y con la situación geográfica en la que se emplaza el puente. Recordemos que en el caso que nos ocupa dicho emplazamiento se sitúa en la ciudad de Calgary, Canadá. Los valores asignados a la temperatura ambiente máxima y mínima para cada mes son los valores medios de los máximos y mínimos registrados a lo largo de un amplio período de retorno en la estación meteorológica de dicha ciudad canadiense (Larousse (55)). Dichos valores se presentan en la tabla 3.9.

| Mes | Temp. ambiente mínima (°C) | Temp. ambiente máxima (°C) |
|------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Enero | -18.0 | -7.5 |
| Febrero | -16.2 | -5.4 |
| Marzo | -10.0 | 1.4 |
| Abril | -0.9 | 12.3 |
| Mayo | 4.7 | 18.5 |
| Junio | 8.5 | 22.3 |
| Julio | 10.0 | 23.8 |
| Agosto | 9.0 | 22.8 |
| Septiembre | 4.2 | 17.4 |
| Octubre | 0.0 | 11.7 |
| Noviembre | -8.3 | 1.5 |
| Diciembre | -14.2 | -5.8 |

Tabla 3.9.- Valores de las temperaturas ambientes mínimas y máximas adoptados en el estudio paramétrico del día del año.

La figura 3.73 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 anual del gradiente vertical máximo positivo sigue una ley de tipo periódico alcanzándose la zona de máximos en los meses de máxima intensidad de radiación solar (Junio, Julio) y la zona de mínimos en meses de mínima intensidad de radiación solar (Diciembre, Enero). En cuanto a la evolución y magnitud de los gradientes térmicos verticales inversos o negativos puede observarse en la misma figura que éstos alcanzan un valor algo significativo en los meses de mínima intensidad de radiación solar. En cualquier caso son de pequeña magnitud no superándose gradientes del orden de 1.3°C.

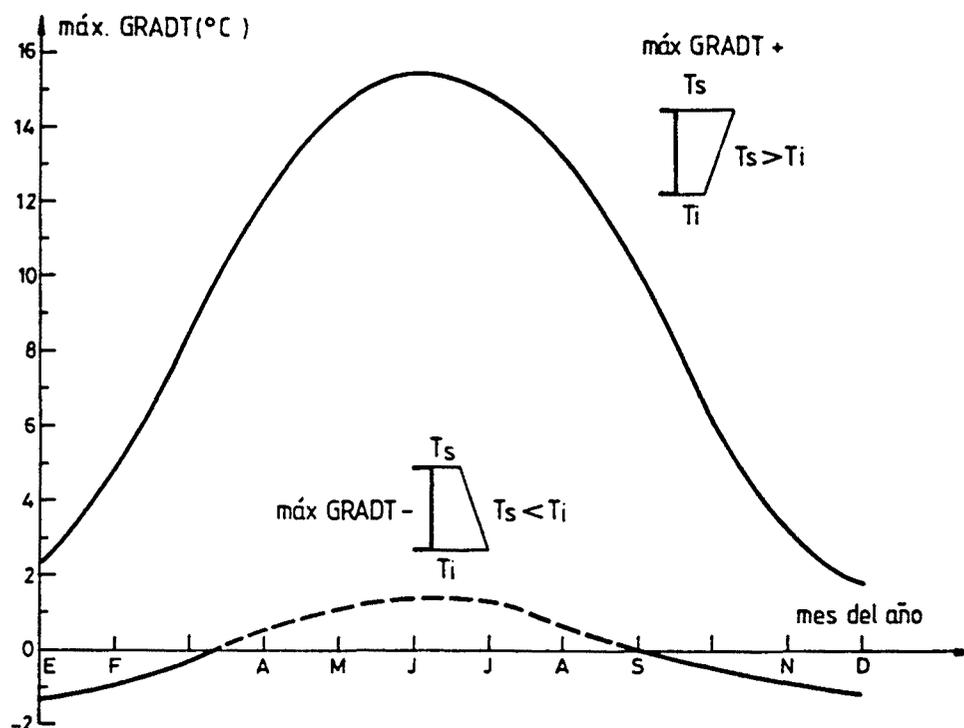


Fig. 3.73.- Evolución de los máximos gradientes verticales positivos y negativos a lo largo del año.

Cabe señalar que el instante para el cual se generan los máximos gradientes positivos tiene lugar, independientemente del mes del año en el que se analiza el problema, en horas posteriores al mediodía solar comprendidas entre las 15 horas y las 16 horas. El instante para el cual se inducen los máximos gradientes verticales negativos tiene lugar entre las 7 horas y 8 horas.

Los resultados obtenidos de los gradientes térmicos transversales quedan reflejados en la figura 3.74 en donde se muestra la evolución anual de los máximos alcanzados para cada mes.

En dicha figura puede apreciarse que en meses de otoño e invierno, fundamentalmente, los valores máximos alcanzados por el gradiente térmico transversal no son despreciables (dichos máximos se encuentran próximos a los 4.5°C). Ello es debido, por una parte, al pequeño ángulo de inclina-

ción de los rayos solares con respecto a un plano horizontal tangente a la superficie terrestre lo cual permite que exista radiación solar incidente sobre uno de los paramentos laterales exteriores de las almas y, por otra, a la propia tipología transversal de la sección. Así pues, si se comparan los resultados obtenidos para puentes losa maciza y para puentes cajón, se llega a la conclusión de que éstos últimos son más sensibles a la acción térmica en sentido transversal.

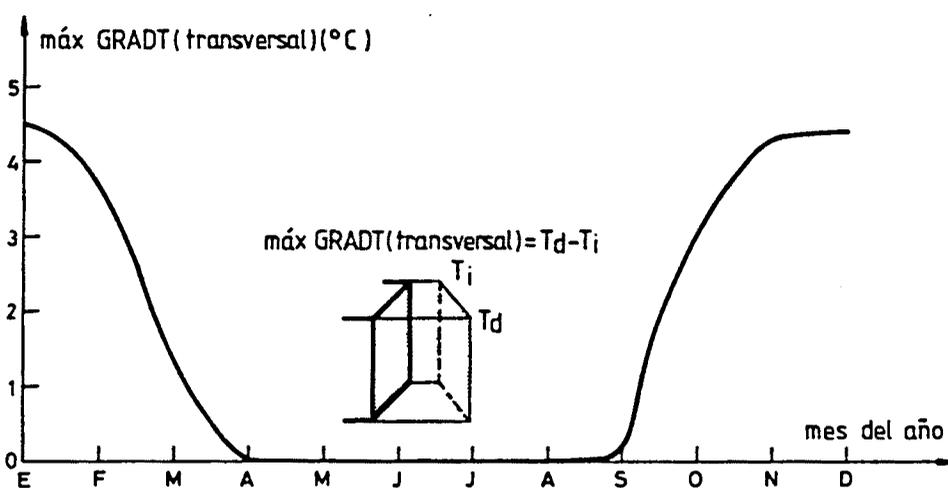


Fig. 3.74.- Evolución del máximo gradiente térmico transversal a lo largo del año.

A continuación, la figura 3.75 muestra las evoluciones de las temperaturas medias máximas y mínimas de la sección a lo largo del año así como la del incremento relativo de temperatura media que tiene lugar en el día analizado, representativo de cada mes.

Como era de esperar, las temperaturas medias máximas y mínimas más altas se alcanzan en los meses de verano y las más bajas en los de invierno. Asimismo, el rango de variación diaria de la temperatura media de la sección alcanza su máximo para los meses de máxima intensidad de radiación solar incidente (Junio, Julio). Dicho rango, o incremento relativo diario de temperatura media, se encuentra próximo a los 7°C , lo que supone una expansión eficaz diaria del puente cajón analizado del orden de 0.06 mm/m .

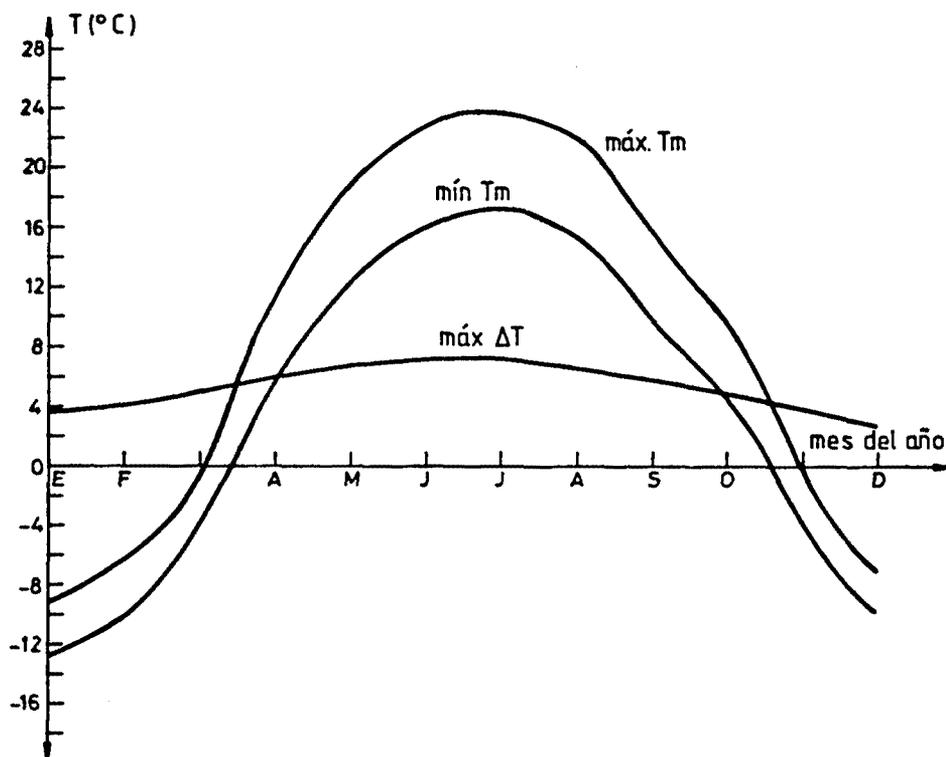


Fig. 3.75.- Evoluciones de las temperaturas medias máxima y mínima de la sección y del incremento relativo diario de temperatura media a lo largo del año.

En cuanto al rango de variación anual de la temperatura media de la sección puede observarse que éste alcanza un valor de 36.6°C (temperatura media máxima de la sección-temperatura media mínima de la sección = 24.0°C (Julio) - (-12.6°C) (Enero) = 36.6°C). Dicho valor no puede compararse con el prescrito por la normativa nacional vigente ya que la respuesta térmica del puente analizado atiende a unas condiciones ambientales y de emplazamiento (Calgary, Canadá, latitud = 51.03°N) no existentes en nuestro país.

No obstante, para poder realizar un análisis comparativo entre los valores obtenido y prescrito por la normativa española ((31), (68)) se ha obtenido la respuesta térmica del puente cajón emplazando éste en el mismo lugar que el puente losa analizado en el apartado anterior del presente capítulo y sometido a las condiciones ambientales y climatológicas existentes en esa zona (Rubí, Barcelona, latitud = 41.4°N). En

este caso, el rango de variación anual de la temperatura media de la sección, expansión eficaz anual, ha sido de 23.7°C. Ello hace pensar que la expansión eficaz anual de un puente es muy sensible a la situación en la que se emplaza dicho puente y a las condiciones ambientales y climatológicas existentes en el lugar de emplazamiento. Este último valor sí puede ser comparado con el prescrito por la normativa nacional ((31), (68)), el cual es de 29.1°C, sensiblemente superior al obtenido analíticamente. Por otra parte, recordemos que en el caso del puente losa analizado en el apartado 3.2 la variación anual de la temperatura media de la sección obtenida analíticamente era de 26°C siendo la prescrita por la normativa nacional de 25.6°C. Todos estos valores, relativos a las variaciones anuales de la temperatura media de la sección, se presentan, a continuación, en la tabla 3.10.

| | | Variación anual de la temperatura media de la sección (°C) | |
|------------------|------------------------------------|--|-----------|
| Puente | Emplazamiento | Normativa española ((31), (68)) | Analítica |
| Losa maciza | Rubí, Barcelona latitud=41.40°N | 25.60 | 26.00 |
| Cajón unicelular | Rubí, Barcelona latitud=41.40°N | 29.10 | 23.70 |
| | Calgary, Canadá latitud=51.03°N | --- | 36.60 |

Tabla 3.10.- Valores de la variación anual de la temperatura media para diversos estudios paramétricos.

Del análisis de los resultados presentados en dicha tabla pueden extraerse algunas conclusiones relativas a la variación anual de la temperatura media de un puente de hormigón:

- Dicha variación es muy sensible a las condiciones climatológicas y ambientales existentes en el lugar de emplazamiento del puente (compárense los resultados obtenidos para el puente cajón unicelular emplazado en el término municipal de Rubí, Barcelona, y en Calgary, Canadá; existe una diferencia de 12.9°C).
- La tipología transversal de la sección influye, aunque de forma mucho más leve, en el valor del rango de variación anual de la temperatura media de la sección (compárense los resultados obtenidos para el puente losa y el puente cajón, ambos emplazados en Rubí, provincia de Barcelona; existe una diferencia de 2.3°C).

Por consiguiente, y a la vista de los resultados obtenidos, parece más lógico el evaluar el rango de variación anual de la temperatura media de la sección de un puente de hormigón en función de las condiciones climatológicas y ambientales existentes en su lugar de emplazamiento, pudiendo reducir éstas a conocer la evolución anual de la temperatura ambiente exterior. Posteriormente, y si se considera necesario, se harán las pertinentes correcciones de acuerdo con la propia tipología transversal de la sección, aunque esto último tiene un mayor interés si lo que se pretende evaluar es la expansión eficaz diaria de un puente y no la anual.

A continuación, la figura 3.76 muestra las evoluciones de las temperaturas máximas y mínimas en el interior de la célula y la del incremento relativo de temperatura. Asimismo también se presenta la evolución de las máximas diferencias de temperatura existentes entre el ambiente exterior e interior de la célula.

Las evoluciones de las temperaturas máximas y mínimas de la célula son totalmente parejas a las de la temperatura media de la sección. En cuanto al perfil de la evolución del rango de variación de la temperatura de la célula puede de-

cirse que es idéntico al de la temperatura media de la sección si bien el primero se ve reducido en una magnitud de aproximadamente 2°C con respecto al de esta última, a lo largo de todo el año.

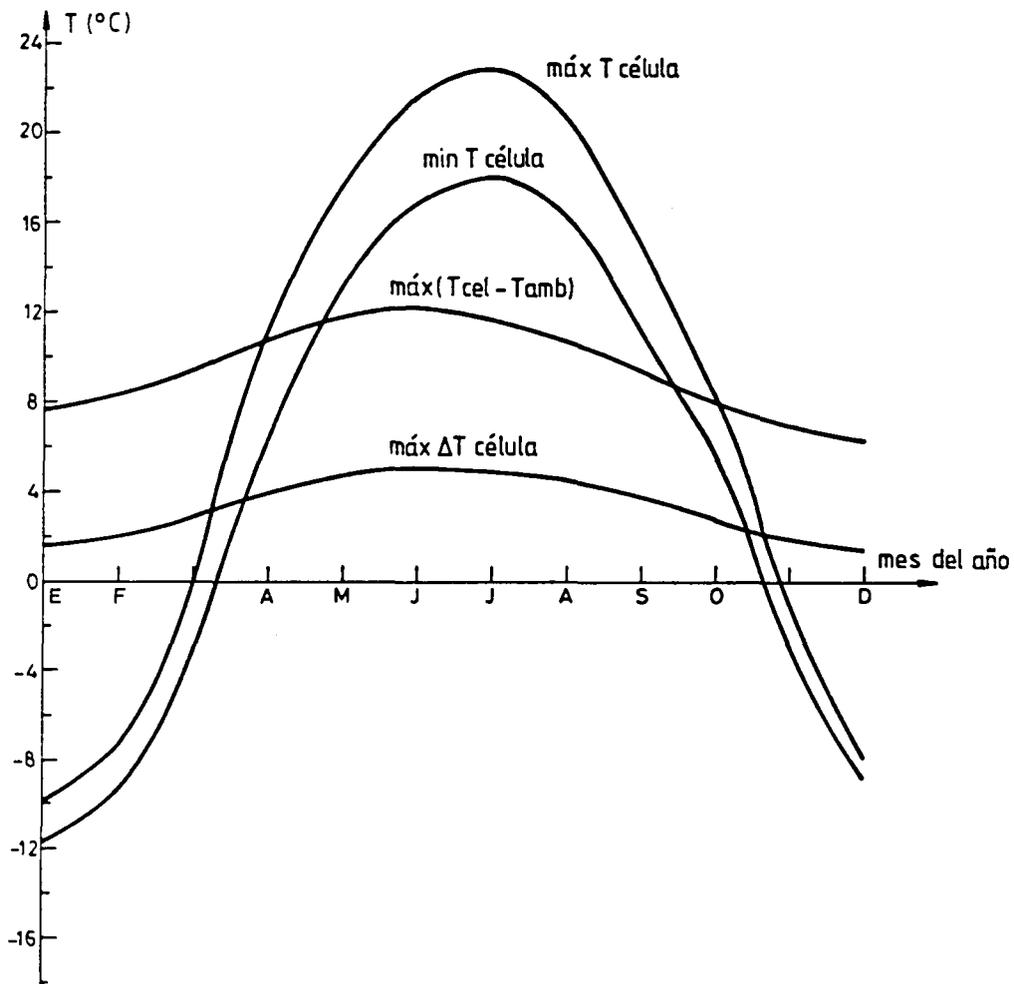


Fig. 3.76.- Evoluciones de las temperaturas máximas y mínimas del aire de la célula, del incremento relativo de dicha temperatura y de las máximas diferencias de temperatura existentes entre célula y ambiente exterior.

En lo referente a la evolución de las diferencias máximas de temperatura entre el interior de la célula y el ambiente exterior (figura 3.76) éstas son mayores en los meses de máxima intensidad de radiación solar (Junio, Julio) si bien hay que hacer hincapié en el hecho de que tales diferencias máximas pueden inducirse en otras épocas del año si sur

gen descensos o aumentos bruscos y repentinos de la temperatura ambiente exterior.

La figura 3.77 muestra la evolución de la tensión de máxima tracción en el hormigón a lo largo del año. En esta misma figura se señalan los nodos en donde aparece dicha tracción máxima.

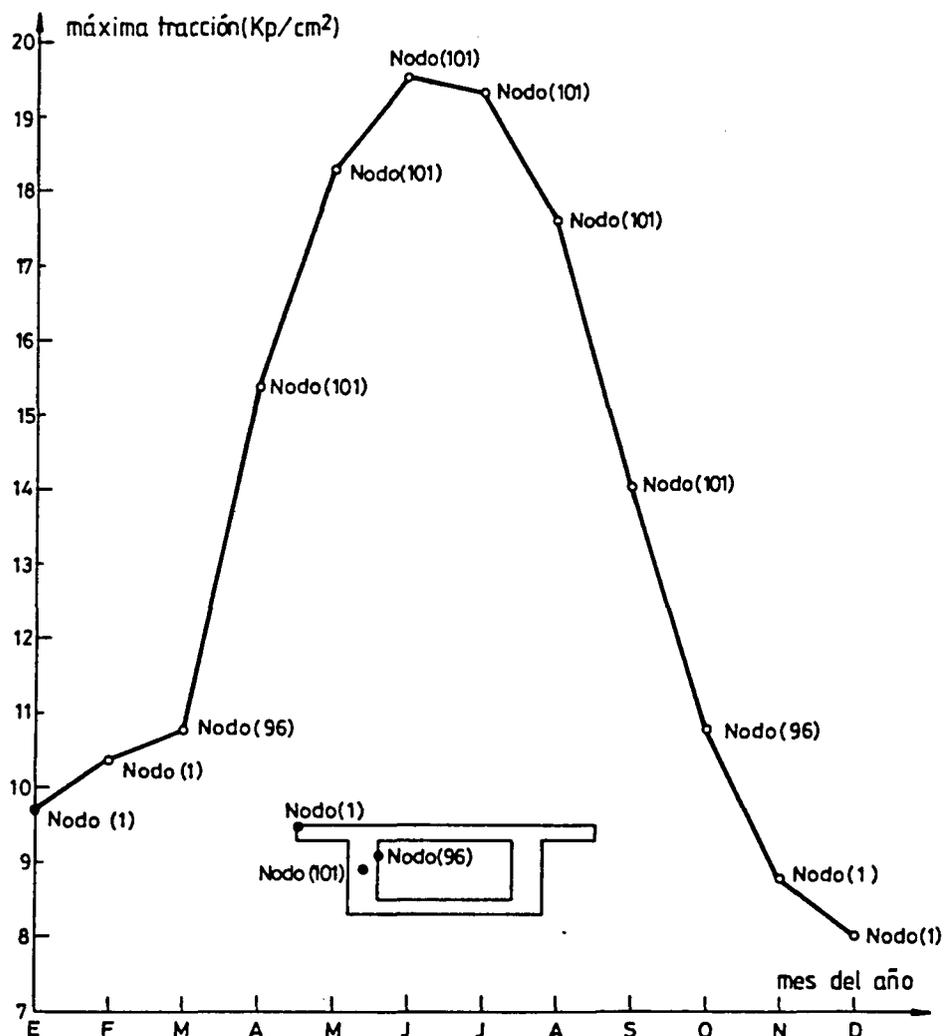


Fig. 3.77.- Tensión máxima de tracción en el hormigón (en nodos 1,96 y 101, figura 3.49) a lo largo del año.

Dicha gráfica da una idea clara de cuáles son las zonas de la sección cajón más solicitadas a tracción. En período de tiempo próximos a las 4 horas dichas zonas se encuentran en los bordes laterales de los voladizos, en los para-

mentos exteriores de las almas y en las esquinas inferiores mientras que, en instantes posteriores al mediodía solar y cercanos al instante de máximo gradiente térmico vertical, las zonas sometidas a máxima tracción son las uniones de las almas con el ala superior.

Por otra parte también puede apreciarse que las mayores tensiones máximas de tracción ocurren en los meses de máxima intensidad de radiación solar (Junio, Julio) mientras que las menores aparecen en meses de mínima intensidad (Noviembre, Diciembre).

En resumen, puede concluirse que el día del año para el cual se evalúa la acción térmica y sus efectos tiene una notable influencia sobre la respuesta térmica y tensional de los puentes cajón. Analizando los resultados derivados del estudio paramétrico se desprenden algunas conclusiones:

- Los perfiles de las distribuciones de temperaturas son muy similares entre sí independientemente del mes del año. La única diferencia estriba en la magnitud de dichas temperaturas, la cual depende de la evolución anual de la temperatura ambiente exterior.
- En días de verano las distribuciones de temperaturas presentan una no linealidad más acusada lo cual hace que se generen tensiones autoequilibradas de mayor magnitud. En días de invierno las tensiones son menores mientras que en primavera y otoño la magnitud de dichas tensiones es similar e intermedia a la existente en las épocas de verano e invierno.
- Los mayores gradientes térmicos máximos y los mayores incrementos relativos de temperatura media de la sección tienen lugar en meses de máxima intensidad de radiación solar (Junio, Julio).

- Los mayores gradientes térmicos transversales máximos ocurren en meses de otoño e invierno alcanzándose valores próximos a los 4.5°C que pueden no ser despreciables.
- Las máximas diferencias de temperatura entre el interior de la célula y el ambiente exterior a lo largo del año suceden en los meses de verano de máxima intensidad de radiación solar (Junio, Julio, Agosto).

Latitud

Para el estudio paramétrico de la latitud geográfica se han adoptado los valores de 10°N , 20°N , 30°N , 40°N , 51.03°N y 60°N los cuales cubren de forma amplia las latitudes del hemisferio Norte (recordemos que la Península Ibérica y las Islas Baleares se encuentran comprendidas entre las latitudes 36°N y $43^{\circ}47'\text{N}$ mientras que las Islas Canarias se encuentran entre $27^{\circ}30'\text{N}$ y $29^{\circ}30'\text{N}$ aproximadamente).

Las figuras 3.78.a y 3.78.b muestran respectivamente las distribuciones de temperaturas y de tensiones que corresponden a los instantes para los cuales se induce la máxima curvatura térmica impuesta vertical en función del valor que adopta la latitud geográfica.

En dichas figuras puede apreciarse que la temperatura en la fibra superior de la sección disminuye de forma notable a medida que el emplazamiento del puente se aleja de las latitudes cercanas al Ecuador mientras que las temperaturas de las fibras intermedias y de la fibra inferior muestran alguna variación pero de poca importancia. De esta forma, las distribuciones del campo de temperaturas en puentes con emplazamientos cercanos al Ecuador presentan una no linealidad más acusada y, por consiguiente, las tensiones autoequilibradas longitudinales asociadas son de mayor magnitud.

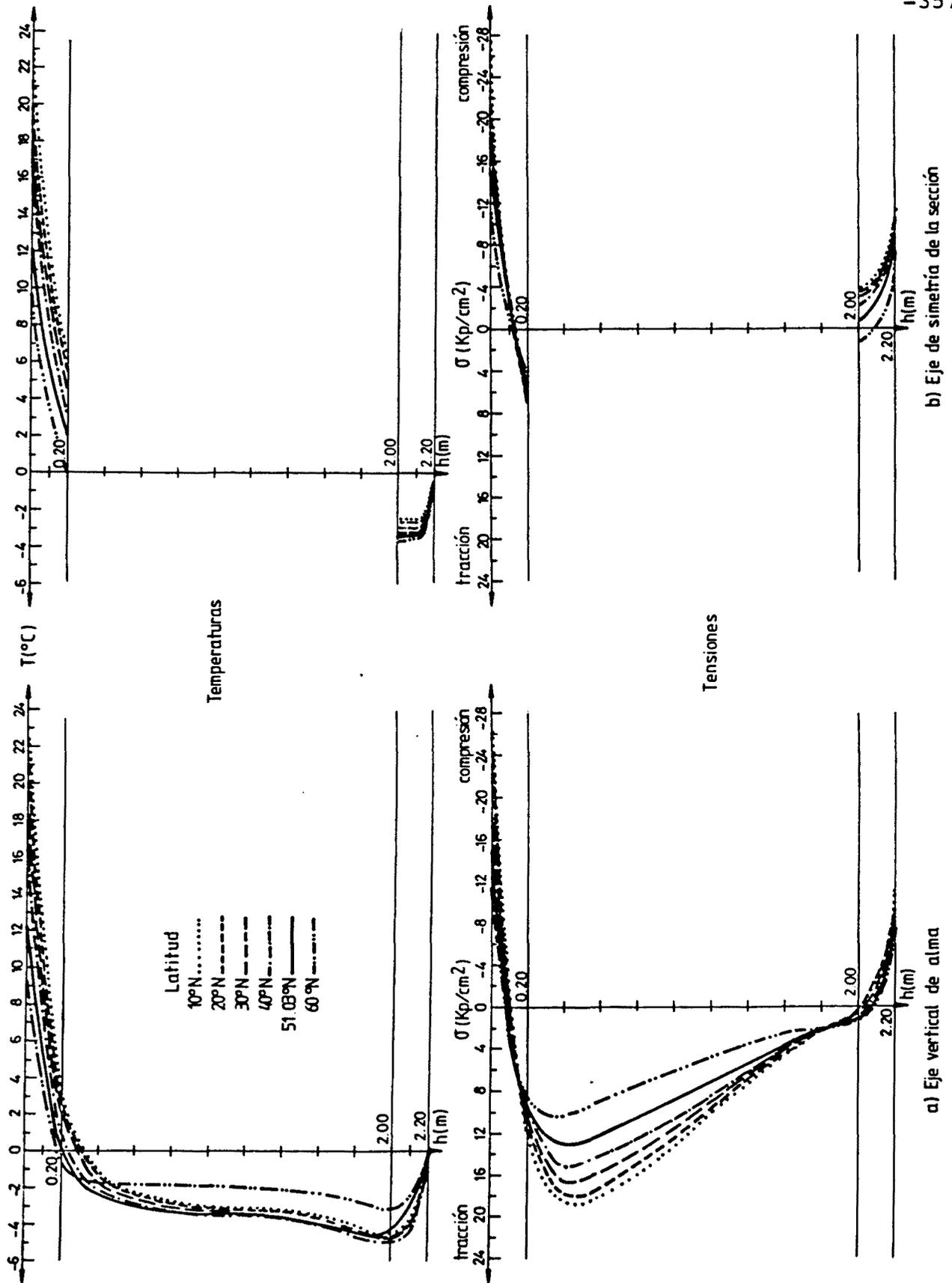


Fig. 3.78.- Distribuciones de temperaturas y tensiones en la sección cajón correspondientes a instantes de máximo gradiente térmico para diferentes latitudes.

En las figuras 3.79.a y 3.79.b se observan las evoluciones diarias del gradiente térmico vertical y de la temperatura media de la sección para las diferentes latitudes analizadas.

En ellas puede apreciarse que los rangos de variación diaria del gradiente y de la temperatura media son mayores cuanto menor es la latitud, es decir cuanto más cercano se encuentra el emplazamiento del puente al Ecuador.

De nuevo queda patente el desfase horario existente entre los instantes de máximos gradientes y máximas temperaturas medias y entre los de mínimos gradientes y mínimas temperaturas medias de la sección. En ambas situaciones dicho desfase horario se mueve en torno a las 2 horas. Como en estudios anteriores, los máximos gradientes aparecen entre las 15 horas y las 16 horas mientras que las máximas temperaturas medias de la sección lo hacen entre las 16.50 horas y 17.50 horas. En cuanto a los mínimos, éstos acaecen a las 6 horas y 8 horas de la mañana respectivamente.

Las evoluciones diarias de la temperatura en el interior de la célula y de la diferencia de ésta y la temperatura ambiente exterior, para los diferentes valores de la latitud, quedan reflejadas en la figura 3.80.

En la primera de ellas, relativa a la evolución diaria de la temperatura en el interior de la célula, se aprecia el desfase temporal existente de dicha evolución con respecto a la de la temperatura media de la sección. En cuanto a la evolución diaria de las diferencias de temperatura entre el interior del cajón y el ambiente exterior se observa que éstas son, en general, considerables y mayores a medida que disminuye la latitud geográfica.

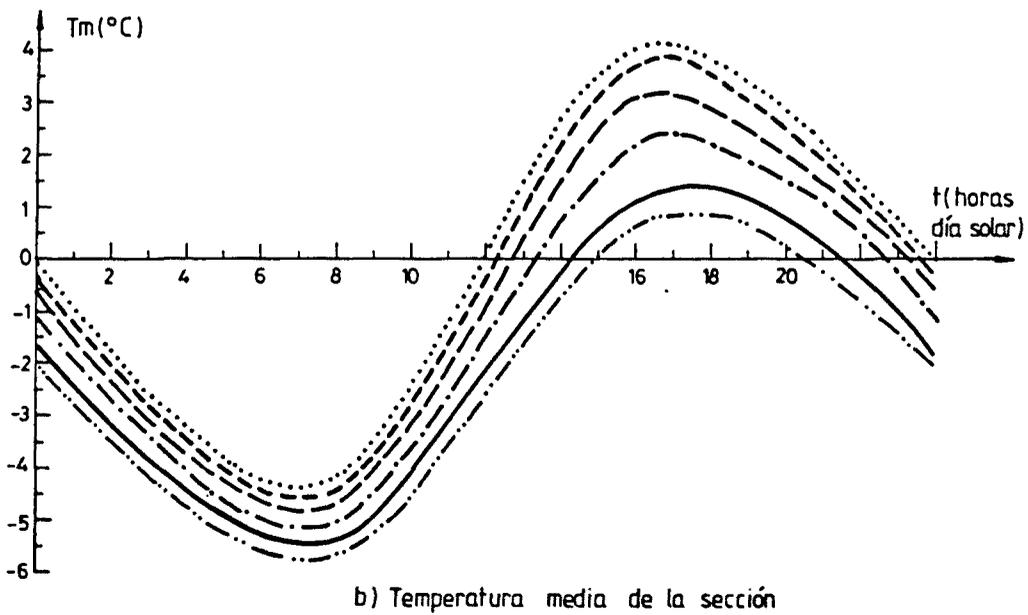
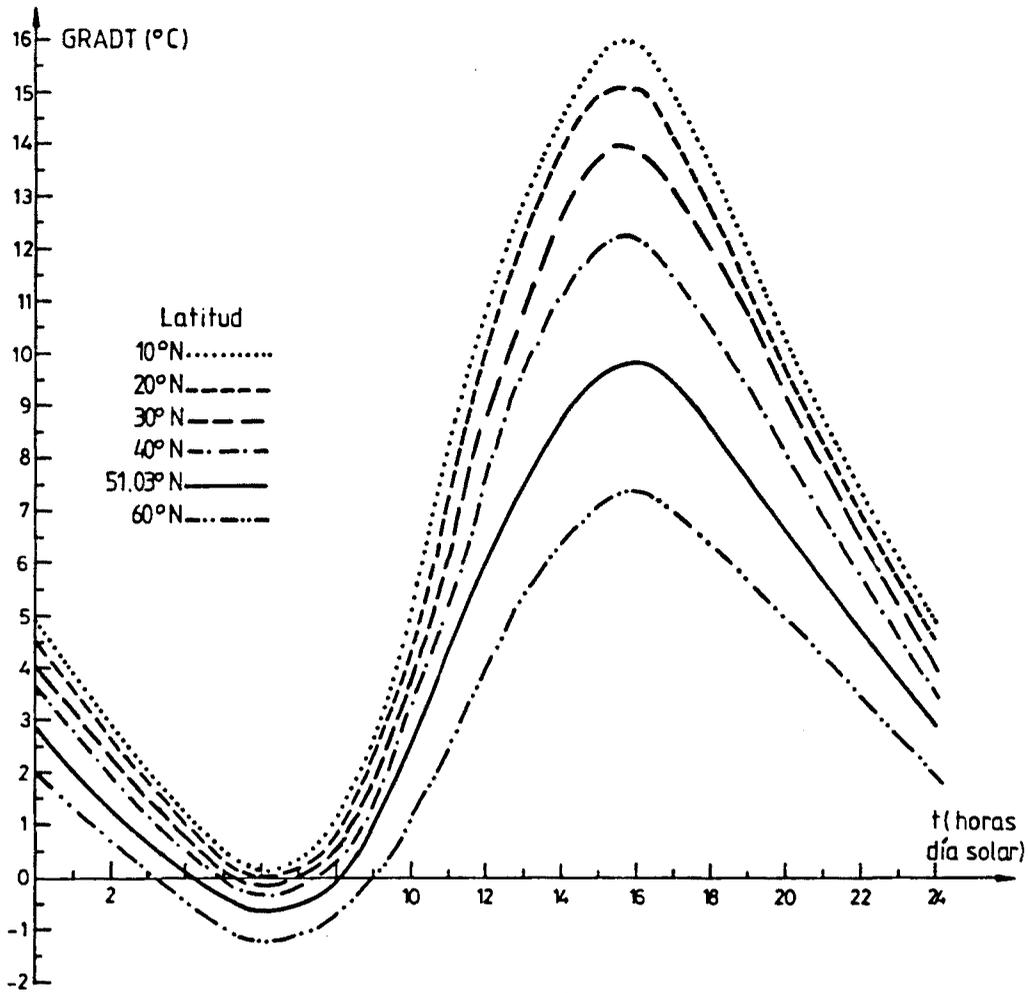
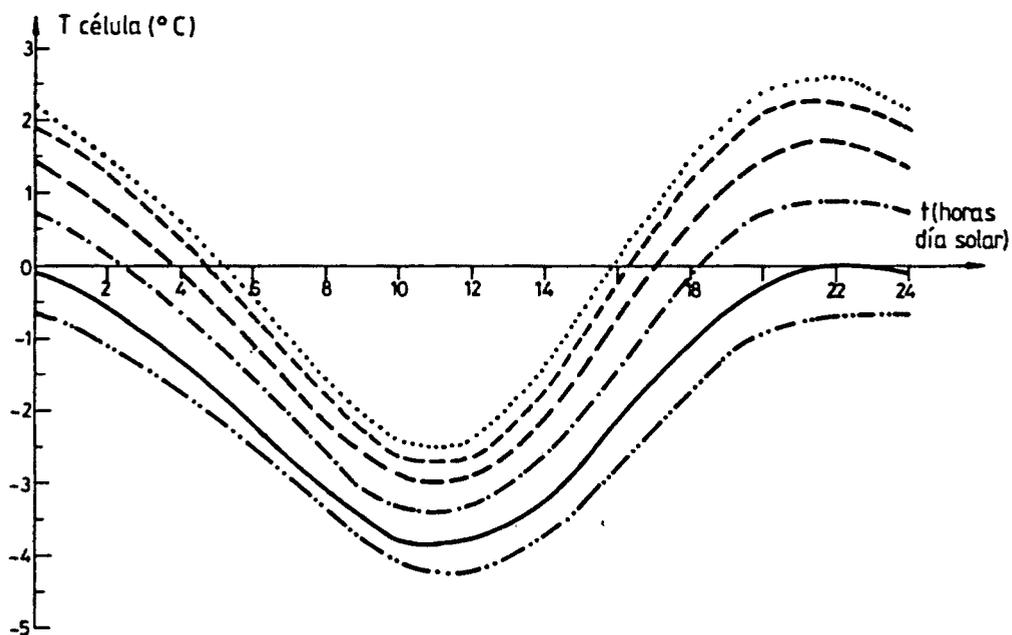
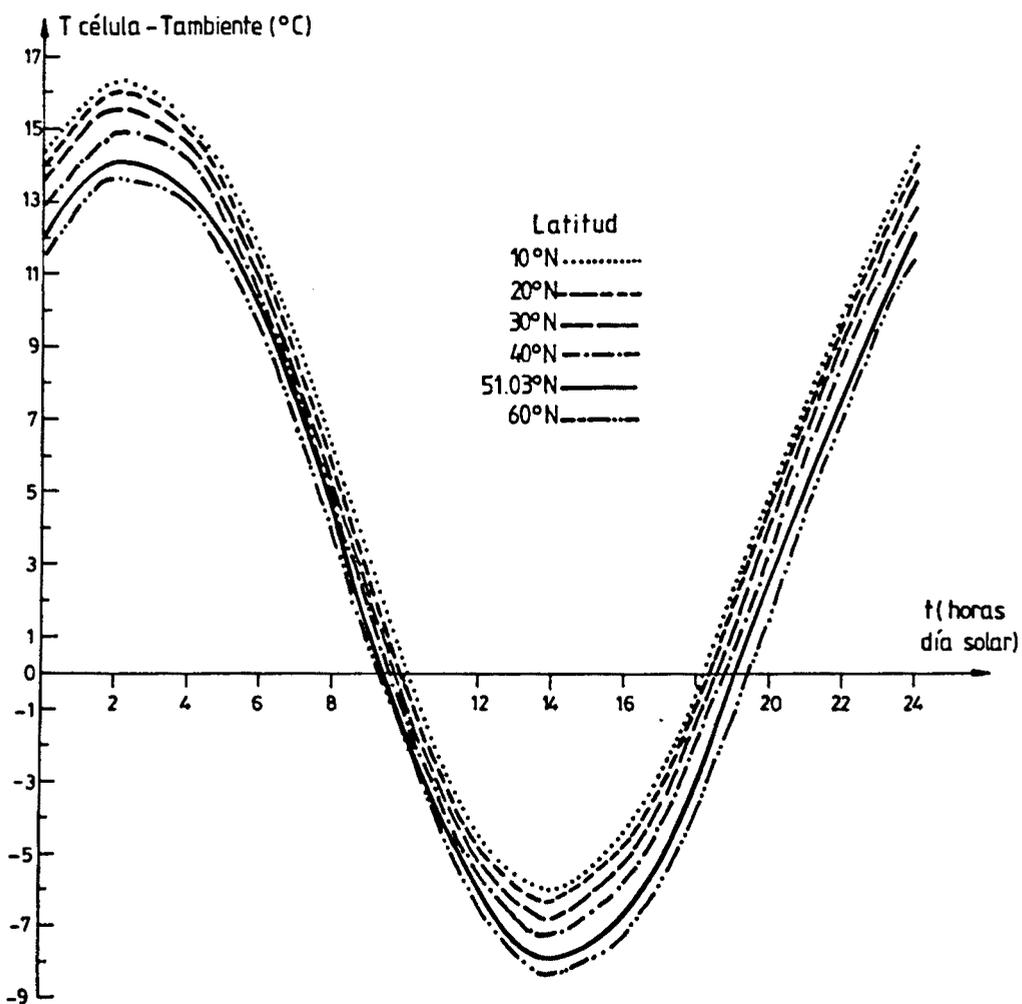


Fig. 3.79.- Evolución diaria del gradiente térmico y de la temperatura me dia de la sección para diferentes latitudes.



a) Temperatura en la célula



b) Diferencia de temperaturas entre el interior de la célula y el exterior

Fig. 3.80.- Evolución diaria de la temperatura del aire de la célula y de la diferencia de temperaturas entre ésta y el ambiente exterior para diferentes latitudes norte.

Las figuras 3.81.a y 3.81.b muestran la influencia del parámetro sobre los gradientes térmicos verticales máximos y sobre los incrementos relativos de temperatura media de la sección cajón analizada.

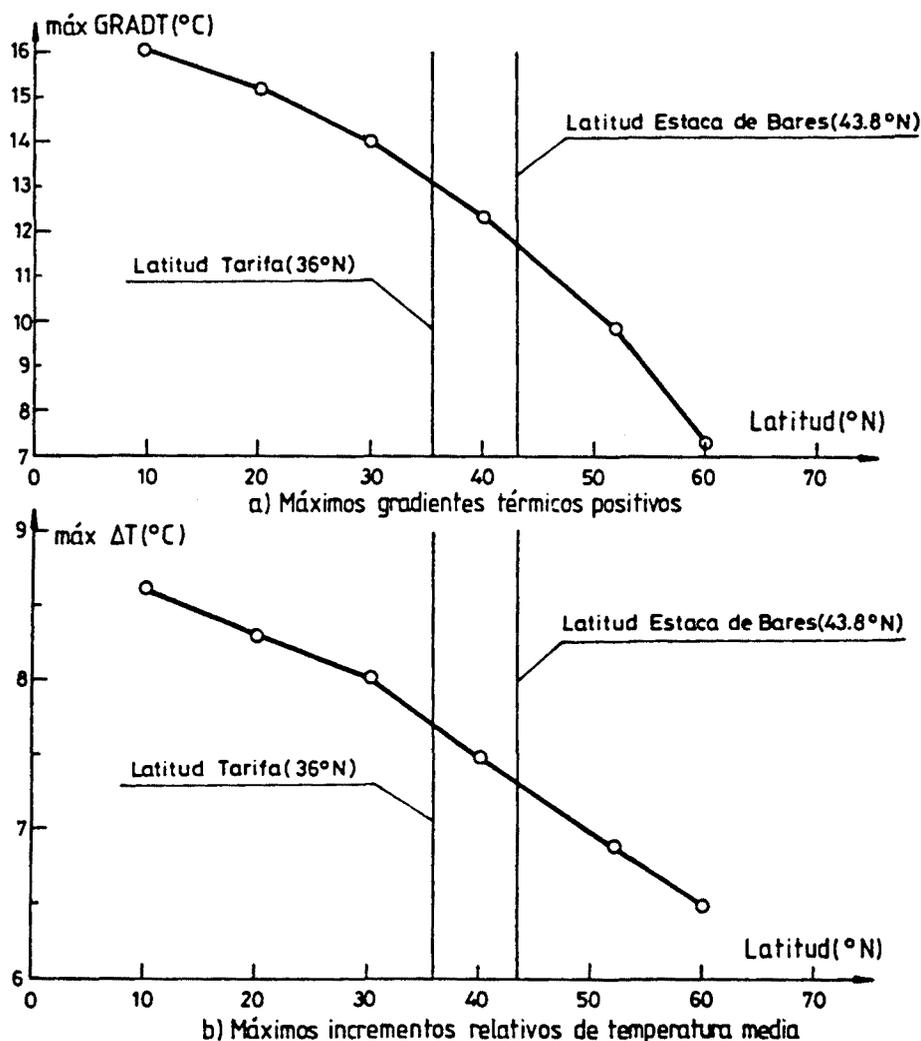


Fig. 3.81.- Influencia de la latitud sobre los máximos gradientes térmicos verticales y los incrementos relativos de temperatura media.

En ellas se puede apreciar que cuanto menor es la latitud geográfica, es decir, cuanto más cercano se encuentra el emplazamiento del puente al Ecuador mayores son las acciones térmicas impuestas diarias observándose una gran influencia de dicho parámetro sobre los gradientes térmicos máximos alcanzados por la sección.

En lo que se refiere a los gradientes térmicos transversales se observa que éstos son nulos para latitudes inferiores a los 45°N debido a que el ángulo de inclinación de los rayos solares con respecto a un plano tangente a la superficie terrestre es elevado. De ahí que los voladizos proyecten sombra sobre los paramentos laterales exteriores de las almas del cajón originándose en estos casos distribuciones térmicas y tensionales perfectamente simétricas con respecto al eje de simetría de la sección cajón analizada.

Para latitudes altas el ángulo de inclinación de los rayos solares disminuye y ello hace que en puentes emplazados en dicha situación geográfica exista radiación solar incidente sobre las almas de la sección cajón. Así pues, es lógico pensar que a medida que nos acerquemos al polo Norte, mayor será la influencia de dicha radiación solar. Todo ello se traduce en una aparición de un cierto gradiente térmico transversal, gradiente que aumenta a medida que aumenta la latitud del emplazamiento del puente. En el caso estudiado se obtiene, para la latitud 51.03°N , un gradiente térmico transversal máximo de 0.6°C a las 15.50 horas mientras que para la latitud de 60°N dicho máximo es de 2.5°C y aparece en el mismo instante.

La figura 3.82 muestra, según diversos ejes verticales, las distribuciones de tensiones longitudinales autoequilibradas correspondientes a los instantes en que, para cada uno de los valores analizados de la latitud, se alcanza la máxima tensión de tracción en el hormigón.

En dicha figura puede observarse que existen dos instantes del día para los cuales se inducen tensiones autoequilibradas de tracción considerables.

Para latitudes bajas, la tensión máxima de tracción en el hormigón aparece a las 16 horas de la tarde siendo la zona solicitada la de unión ala superior-alma.

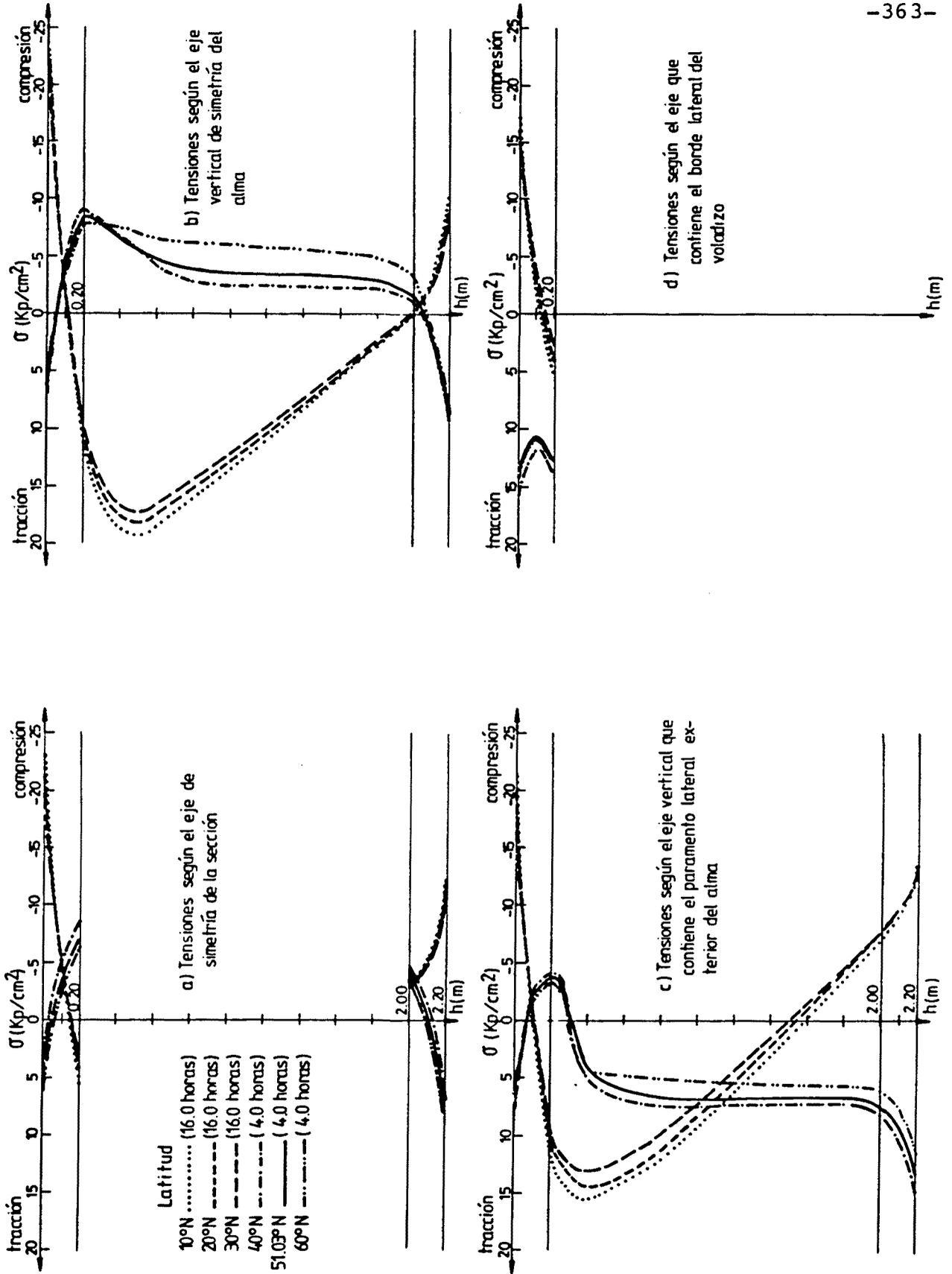


Fig. 3.82.- Distribuciones de tensiones autoequilibradas correspondientes al instante en el que se genera la máxima tracción para diferentes latitudes.

Para latitudes altas, dicha tracción máxima se genera a las 4 horas de la mañana siendo las zonas más solicitadas a tracción los paramentos laterales exteriores de las almas y, en concreto, las esquinas inferiores de la sección y los bordes laterales de los voladizos.

En cuanto a la relación entre la magnitud de las tensiones autoequilibradas y el parámetro analizado puede apreciarse que aquélla crece a medida que el emplazamiento del puente se encuentra más cercano al Ecuador.

Por consiguiente, se puede concluir que para las latitudes bajas, emplazamientos cercanos al Ecuador, las tensiones térmicas autoequilibradas son de mayor magnitud que las que se obtienen para latitudes altas, de emplazamientos de puente cercanos al polo.

Resumiendo, del análisis de los resultados del presente estudio paramétrico pueden extraerse las siguientes conclusiones:

- Las distribuciones de temperaturas correspondientes a latitudes bajas presentan una no linealidad más acusada que las correspondientes a latitudes altas. Ello se traduce en un aumento de las tensiones autoequilibradas longitudinales.
- A latitudes bajas corresponden mayores rangos de variación diaria del gradiente térmico vertical y de la temperatura media de la sección. Asimismo, cuanto más baja es la latitud de emplazamiento del puente mayores son los gradientes verticales máximos y los incrementos relativos de temperatura media de la sección.
- A medida que aumenta la latitud de emplazamiento del puente, el gradiente térmico transversal va en aumento alcanzándose para latitudes cercanas a los 60°N

gradientes transversales de cierta consideración, próximos a los 3°C.

- Se aprecian diferencias notables entre la temperatura de la célula y la temperatura ambiente exterior, diferencias que se hacen algo más acusadas cuanto más baja sea la latitud de emplazamiento del puente.

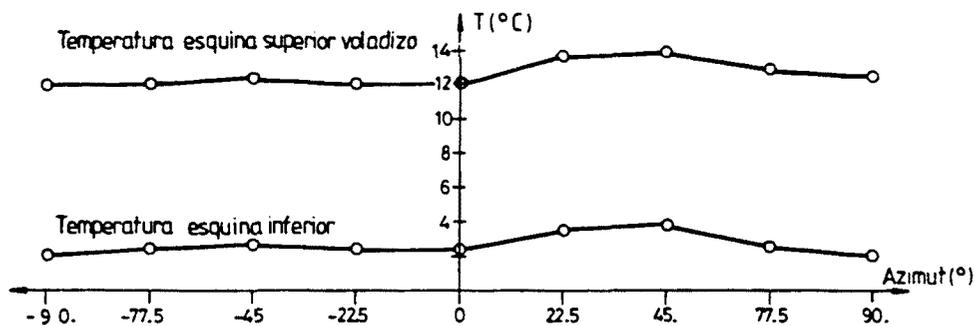
Azimut

Como ya se ha comentado con anterioridad en el apartado 3.2, del análisis de los resultados obtenidos en el estudio paramétrico de este factor en puentes losa maciza se desprende la conclusión de que el azimut no jugaba un papel importante en el fenómeno de la transmisión de calor siendo su influencia sobre las distribuciones térmicas y tensionales y sobre las acciones térmicas impuestas muy poco notoria.

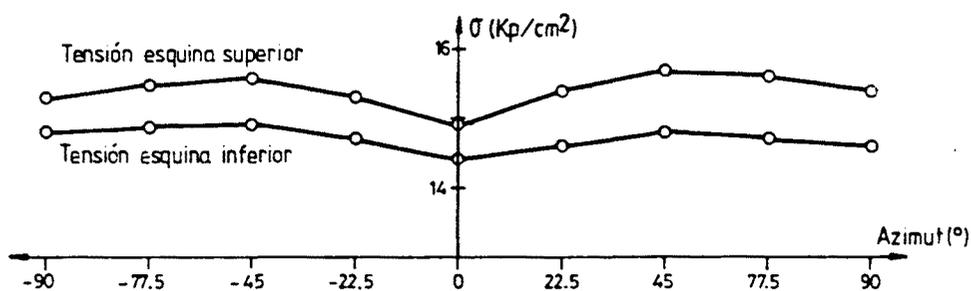
Tales conclusiones podrían haber sido extrapoladas a la tipología transversal de sección en cajón. No obstante, debido a la propia tipología a analizar se cree oportuno el estudiar dicho parámetro con objeto de visualizar y cuantificar su influencia sobre las distribuciones tensionales y acciones térmicas impuestas y, más en concreto, sobre los gradientes térmicos transversales.

El presente estudio paramétrico se ha llevado a cabo para valores del azimut de -90° , -77.5° , -45° , -22.5° , 0° , 22.5° , 45° , 77.5° y 90° .

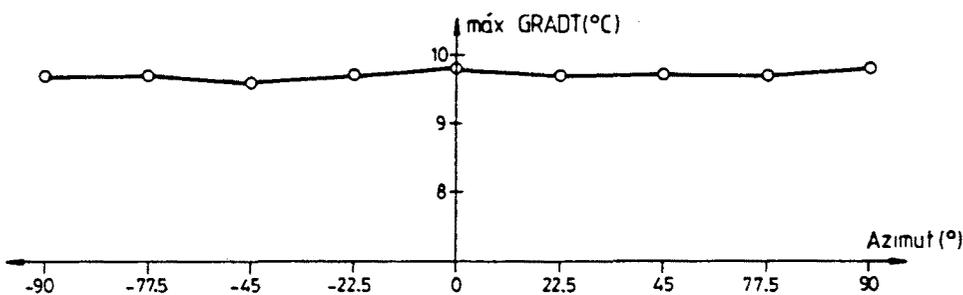
La figura 3.83 muestra la influencia que ejerce dicho parámetro sobre las temperaturas y tensiones de las esquinas superior e inferior de la sección y sobre las acciones térmicas máximas diarias, a saber, gradientes térmicos verticales, gradientes térmicos transversales e incrementos relativos de temperatura media de la sección.



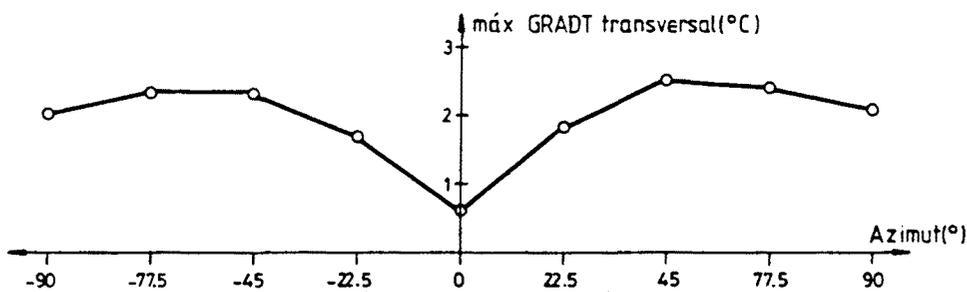
a) Temperaturas en esquina inferior y esquina superior voladizo correspondientes a instantes de máximo gradiente térmico vertical



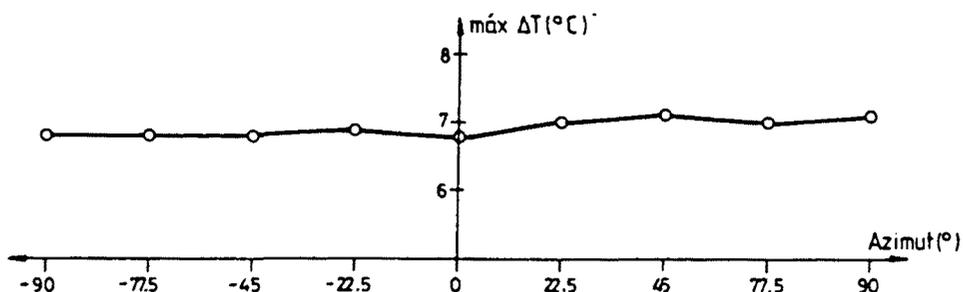
b) Tensiones de tracción en esquina inferior y esquina superior voladizo correspondientes a instantes de máxima tracción en el hormigón



c) Gradientes térmicos verticales máximos



d) Gradientes térmicos transversales máximos



e) Incrementos relativos de temperatura media

Fig. 3.83.- Influencia del azimuth sobre las distribuciones térmicas y tensionales y sobre las acciones térmicas impuestas diarias.

A la vista de los resultados presentados puede concluirse que la influencia del azimut sobre las distribuciones de temperaturas y de tensiones longitudinales equilibradas es prácticamente nula. En lo referente a las acciones térmicas diarias también puede observarse que los gradientes térmicos verticales y los incrementos relativos de temperatura media de la sección se mantienen prácticamente constantes independientemente del valor adoptado por el azimut.

No obstante, observando la figura 3.83.d, se aprecia que dicho parámetro sí influye en el valor del gradiente térmico transversal, siendo éste mínimo cuando el azimut del puente es nulo -eje del puente E-O-. La situación más desfavorable, para la cual se alcanzan los mayores valores de los máximos gradientes térmicos transversales, tiene lugar con azimuts -45° , -eje del puente NE-SO-, y 45° -eje del puente NO-SE-. Dichos valores máximos se sitúan próximos a los 2.5°C .

Por otra parte, el variar el azimut no introduce ningún tipo de distorsión en las distribuciones de tensiones correspondientes a instantes en los que se genera la máxima tracción en el hormigón, siendo las zonas más solicitadas la unión ala superior-alma y los paramentos laterales y bordes exteriores de los voladizos.

Resumiendo, del estudio paramétrico pueden extraerse las siguientes conclusiones:

- La influencia del azimut sobre las distribuciones de temperaturas y de tensiones autoequilibradas es prácticamente nula.
- La influencia del azimut sobre los gradientes térmicos verticales e incrementos relativos de temperatura media de la sección también es prácticamente nula.

- Las diferencias de temperatura existentes entre el interior de la célula y el ambiente exterior no sufren variaciones al variar el valor del azimut.
- Se observa una influencia clara del azimut sobre la magnitud de los gradientes térmicos transversales. Las situaciones más desfavorables aparecen con orientaciones del puente NE-SO (azimut -45°) y NO-SE (azimut 45°) alcanzándose en estos casos gradientes transversales máximos del orden de 2.5°C .

3.3.1.2.- Influencia de la geometría de la sección

Con anterioridad a este apartado se han ido mencionando diversos aspectos de la distribución del campo de temperaturas en puentes cajón relacionados con la geometría de la sección (por ejemplo, la longitud de los voladizos, el volumen de la célula,...). Por dicha razón se desarrolla este apartado, el cual tiene por objeto el conocer y analizar la influencia del diseño de la sección cajón sobre las distribuciones de temperaturas y, por lo tanto, sobre las acciones térmicas y tensiones a nivel seccional asociadas a tales distribuciones.

Las relaciones o parámetros geométricos que se analizarán a continuación son los siguientes:

- Relación espesor ala superior-espesor alma
- Relación longitud de voladizo-canto del alma
- Variación del canto de la sección en puentes de inercia variable
- Existencia de cartelas.

El análisis de cada uno de estos factores se basa en un estudio paramétrico de análogas características a los que se han venido desarrollando. Dicho estudio adopta como sección de referencia la sección transversal en cajón presenta-

da en la figura 3.49 (dicha sección puede contemplarse también en la figura 3.84.b). Los valores asignados a los parámetros físicos, estructurales, ambientales y de emplazamiento son los expuestos en la tabla 3.7. Recordemos aquí que el puente se emplaza en Calgary, Canadá, a una latitud de 51°N y que el día del año para el cual se obtiene la respuesta térmica y tensional es el 21 de Marzo.

Lógicamente las relaciones geométricas a analizar y su variación atienden meramente al objetivo expuesto al principio de este apartado y, en cualquier caso, las conclusiones que se extraigan de los estudios paramétricos no deben entenderse nunca como parámetros definitorios y unívocos del diseño de la sección transversal. Como es evidente, las dimensiones de ésta y espesores de alas y almas deben atender a un conjunto de condicionantes de diseño relativos a la seguridad y funcionalidad de la propia estructura del puente que son conocidos por todos.

Relación espesor ala superior-espesor alma

El estudio paramétrico de esta relación de espesores se ha llevado a cabo analizando las tres secciones transversales que se presentan en la figura 3.84.

Las figuras 3.85.a y 3.85.b muestran las distribuciones de temperaturas y de tensiones correspondientes a los instantes para los cuales se inducen los máximos gradientes térmicos verticales en cada una de las secciones analizadas.

A la vista de los resultados presentados en dicha figura puede concluirse que la influencia de dicha relación geométrica no es significativa en lo que se refiere al perfil y magnitud de las distribuciones de temperaturas y de tensiones longitudinales autoequilibradas si bien se aprecia que cuanto más elevado es el espesor de las almas, la sección transversal presenta una mayor inercia térmica por lo que la temperatura en las fibras intermedias es, ligeramente, de menor magnitud.

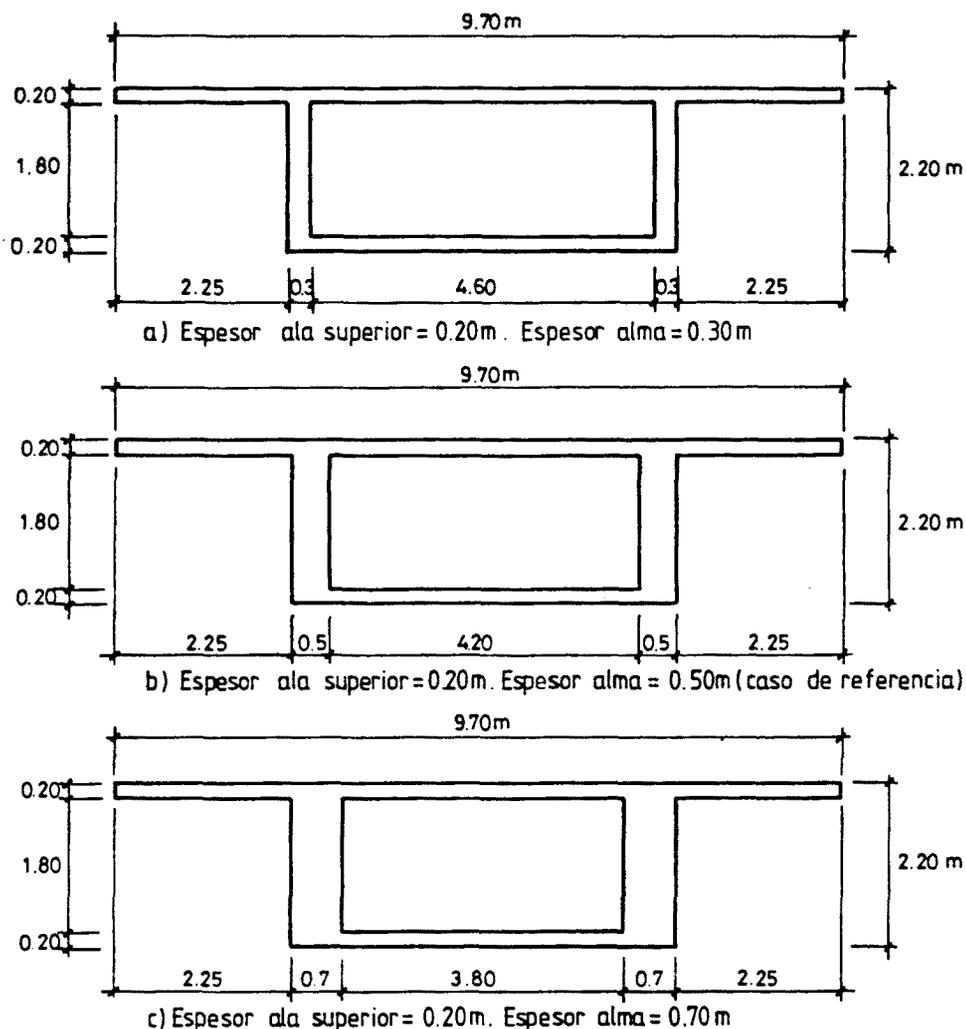


Fig. 3.84.- Secciones transversales analizadas en el estudio paramétrico de la relación espesor ala superior-espesor alma.

Ello no conlleva necesariamente variaciones sustanciales en las magnitudes de las tensiones longitudinales autoequilibradas y, si éstas aparecen, son debidas, fundamentalmente, a los cambios experimentados por las propias características geométricas de la sección -posición del centro de gravedad, área y momentos de inercia-.

Las figuras 3.86.a y 3.86.b muestran respectivamente las evoluciones diarias del gradiente térmico vertical y de la temperatura media de la sección en función del espesor adoptado por el alma.

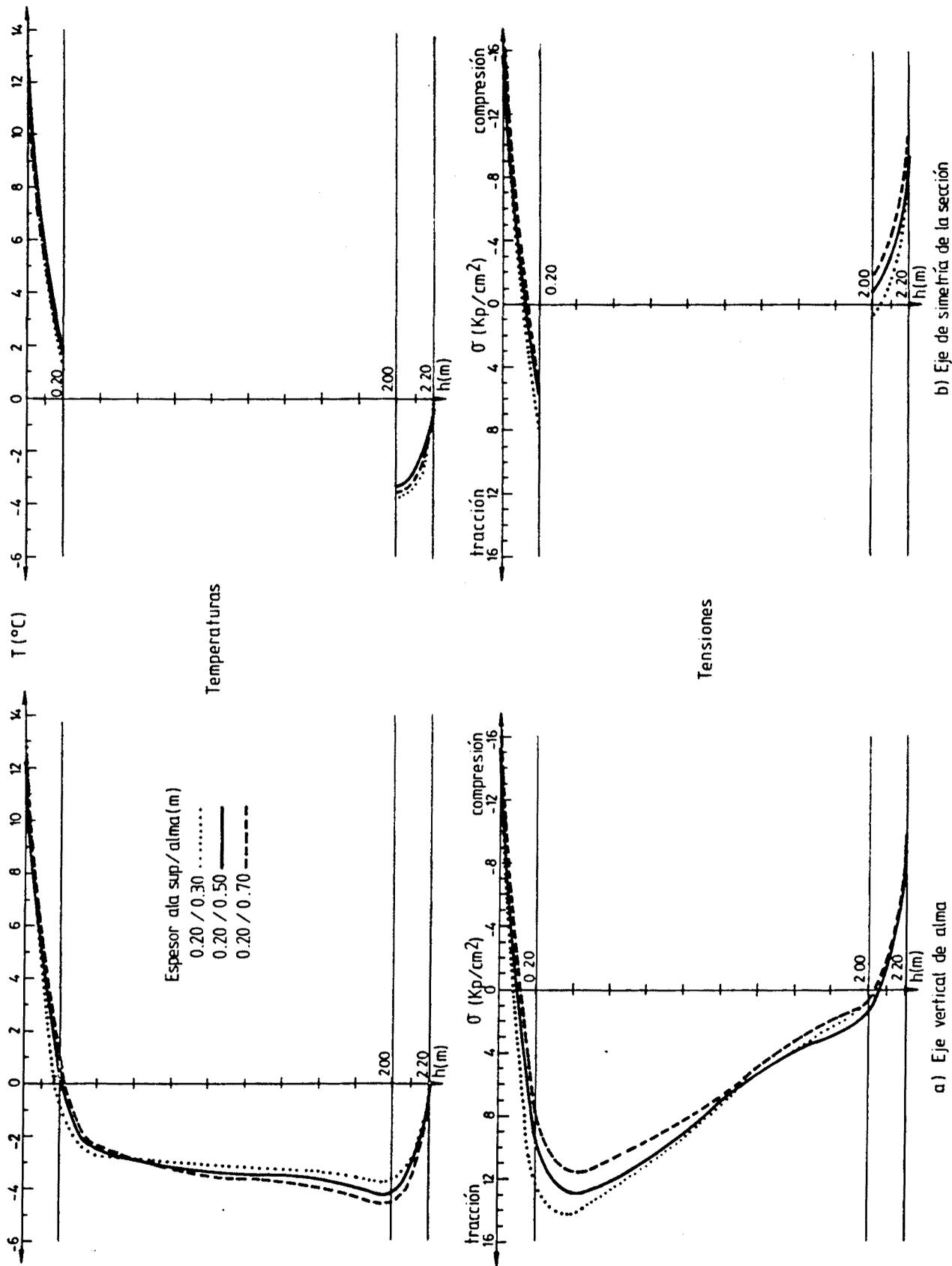


Fig. 3.85.- Distribuciones de temperaturas y tensiones en la sección ca-
 jón correspondientes a instantes de máximo gradiente térmico
 para diferentes relaciones esesor ala superior-alma.

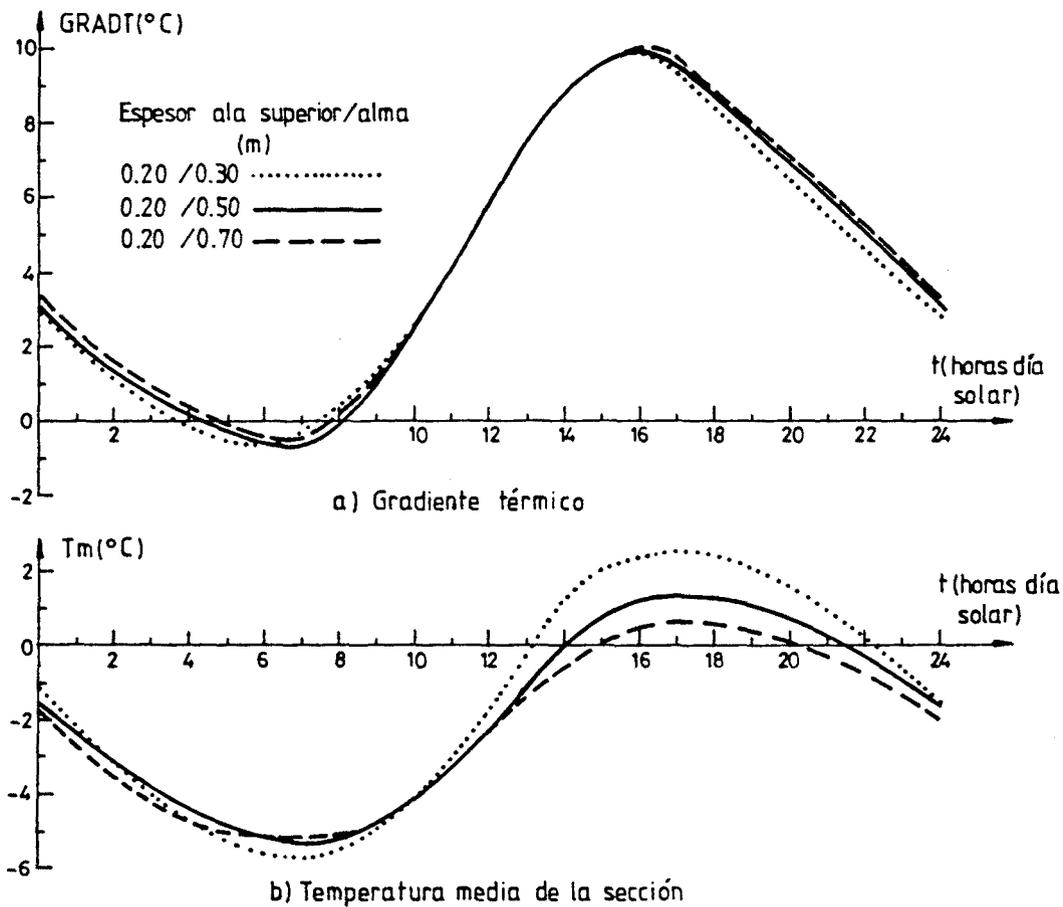


Fig. 3.86.- Evolución diaria del gradiente térmico vertical y de la temperatura media de la sección para diferentes relaciones espesor ala superior-alma.

En la primera de ellas puede apreciarse que variar el espesor del alma no introduce ningún cambio substancial en la evolución del gradiente térmico vertical. No obstante en la figura correspondiente a la evolución de la temperatura media de la sección puede observarse que cuanto mayor es el espesor del alma menor es el rango de variación diaria de dicha temperatura media y menores son también las temperaturas medias máximas. Así pues, puede concluirse que, a igualdad del resto de condiciones geométricas, cuanto mayor es el espesor de las almas o, lo que es lo mismo, cuanto menor es el volumen de aire encerrado en la célula mayor es la inercia térmica de la sección.

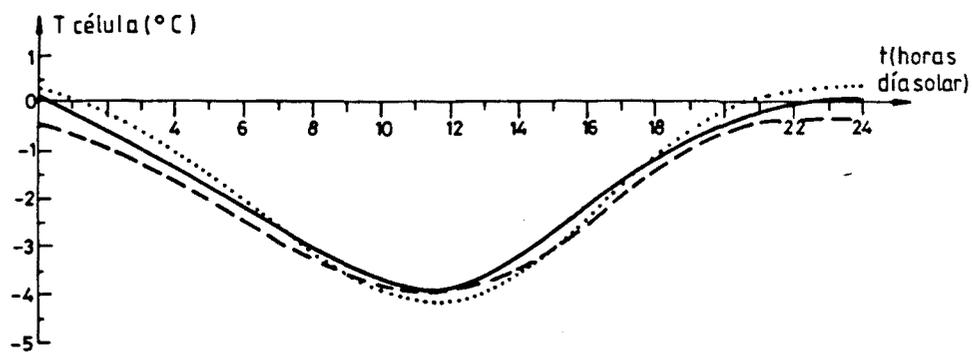
Las evoluciones diarias de la temperatura del aire de la célula y de la diferencia de temperaturas entre el interior de la célula y el ambiente exterior en función de las distintas relaciones de espesores entre el ala superior y el alma pueden contemplarse en las figuras 3.87.a y 3.87.b respectivamente.

De ambas figuras se desprende que a medida que aumenta el espesor de alas y almas que envuelven a la célula menor es la oscilación diaria de la temperatura del aire encerrado en dicha célula. De ahí que, atendiendo únicamente a la consideración de este factor, se esté en condiciones más desfavorables con respecto a la sollicitación térmica transversal en los casos de secciones en cajón con pequeños espesores de almas.

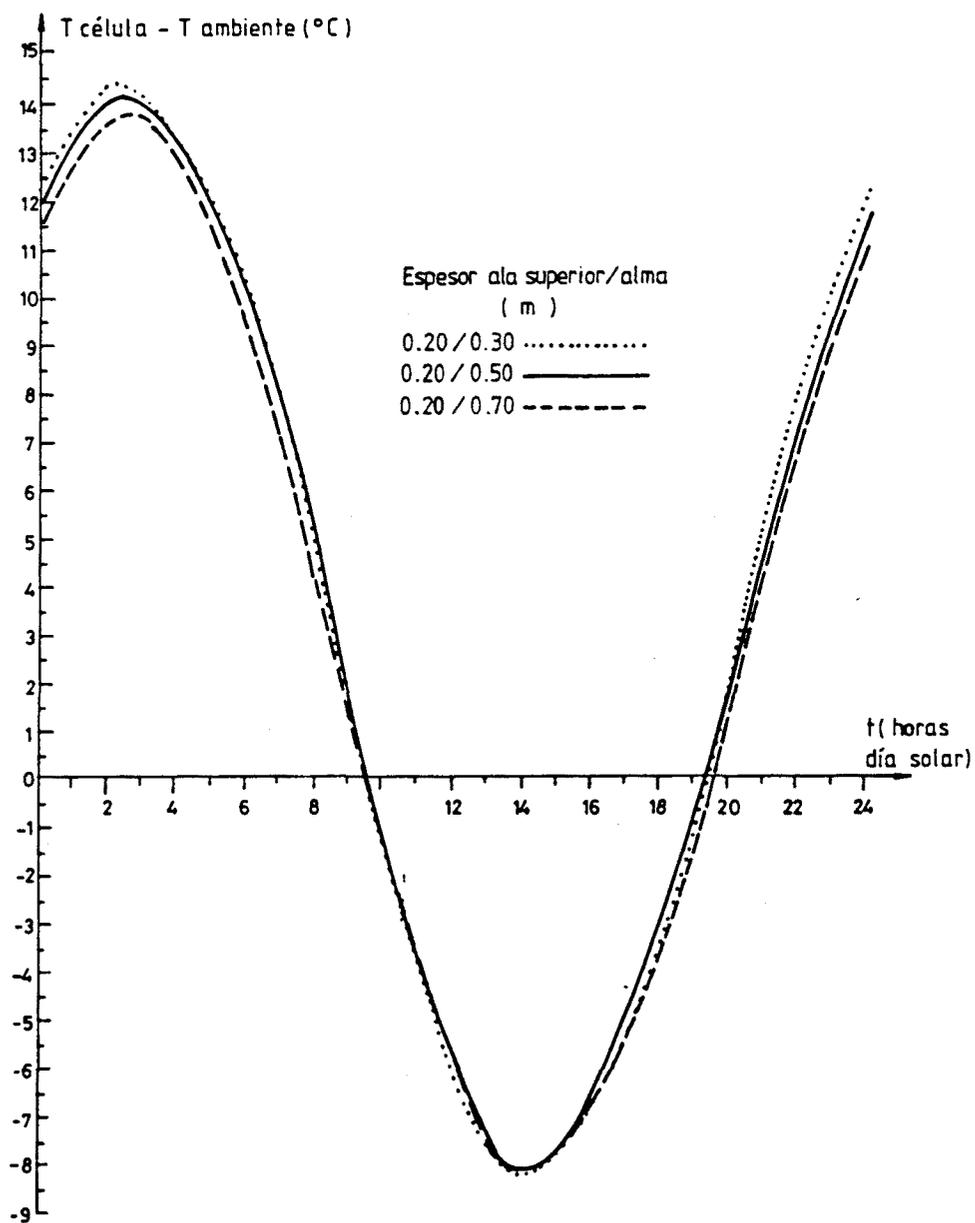
La figura 3.88 muestra la influencia del espesor del alma sobre los gradientes verticales máximos y sobre los incrementos relativos de temperatura media de la sección.

En ella se observa que el gradiente máximo no se ve influenciado por el valor adoptado por la relación de espesores ala-alma y que la expansión eficaz diaria de un puente cajón es mayor cuanto menor es el espesor del alma.

En cuanto al gradiente térmico transversal, los resultados obtenidos para los máximos alcanzados por esta acción térmica muestran una ligera tendencia a aumentar de magnitud a medida que aumenta el espesor de las almas del cajón. En efecto, para espesores elevados la transmisión de calor desde el contorno exterior hacia el interior de la célula se hace más lenta y difícil. De esta forma, la respuesta térmica de las dos almas del cajón se independiza entre sí no existiendo transmisión de calor entre dichas almas a través del aire de la célula. En cualquier caso, los valores máximos obtenidos no son significativos no superándose gradientes de 0.7°C , valor éste obtenido para el caso de sección cajón con espesor de almas de 0.70 metros.



a) Temperatura en la célula



b) Diferencia de temperaturas entre el interior de la célula y el exterior

Fig. 3.87.- Evolución diaria de la temperatura del aire de la célula y de la diferencia de temperaturas entre ésta y el ambiente exterior para diferentes relaciones espesor ala superior-alma.

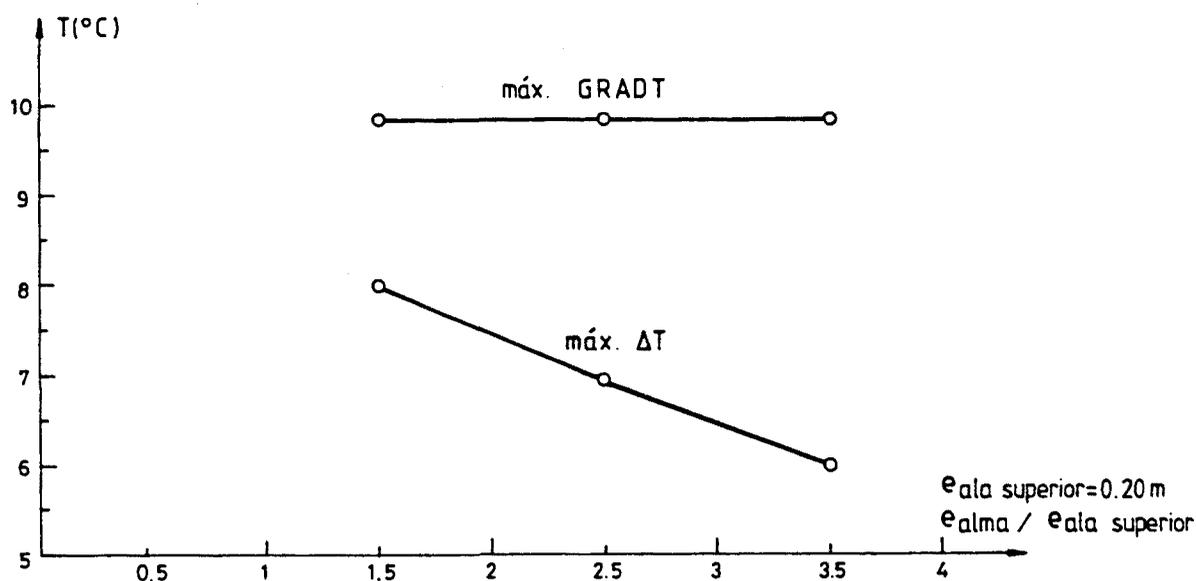


Fig. 3.88.- Influencia de la relación de espesores ala superior-alma sobre los máximos gradientes térmicos verticales y los incrementos relativos de temperatura media.

La figura 3.89 muestra distribuciones tensionales longitudinales autoequilibradas según diversos ejes verticales para cada una de las relaciones de espesores ala-alma analizadas. Dichas distribuciones corresponden a los instantes en los que se genera la máxima tensión de tracción en el hormigón.

En dicha figura puede apreciarse que para secciones cajón con almas de pequeño espesor las tensiones de tracción más elevadas aparecen en horas posteriores al mediodía solar próximas al instante de máximo gradiente térmico vertical siendo la zona solicitada la de unión del alma con el ala superior y, en concreto, las fibras que se encuentran en contacto con el aire de la célula. Para secciones cajón con fuertes espesores de almas el instante de máxima tracción en el hormigón ocurre próximo a las 4 horas de la madrugada siendo las zonas más solicitadas los paramentos laterales exteriores de las almas y los bordes laterales de los voladizos.

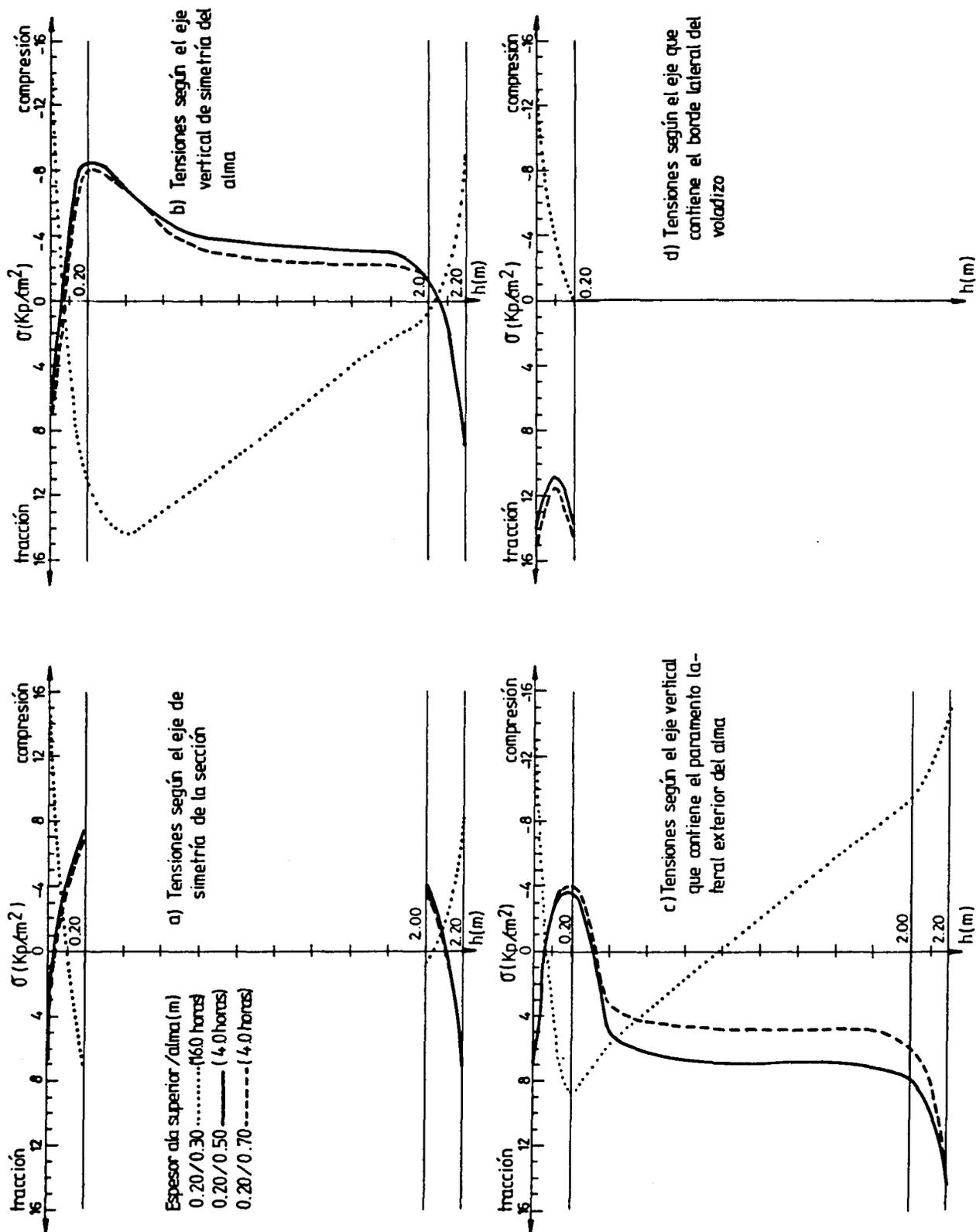


Fig. 3.89.- Distribuciones de tensiones autoequilibradas longitudinales correspondientes al instante en el que se genera la máxima tracción en el hormigón para diferentes relaciones de espesores ala superior-alma.

En cuanto a la relación entre la magnitud de las tensiones autoequilibradas longitudinales y el parámetro geométrico analizado es difícil extraer alguna conclusión ya que al variar el espesor de las almas y mantener constantes las restantes dimensiones de la sección se introducen cambios substanciales en las características geométricas de ésta, posición del centro de gravedad, área y momentos de inercia los cuales influirán en la respuesta tensional.

En todo caso, se hace patente el hecho de que existen dos instantes críticos del día en lo que se refiere a alcanzar máximas tensiones de tracción en el hormigón y ello siempre ocurre así independientemente de la tipología de la sección transversal del puente. El primero de ellos acaece a primeras horas de la mañana, entre las 3 horas y las 5 horas y el segundo a horas posteriores al mediodía solar y próximas al instante de máximo gradiente térmico vertical, entre las 15 horas y las 17 horas. El que dicho instante se acerque más a la cota inferior o a la cota superior de estos intervalos dependerá de los valores adoptados por los diferentes parámetros que entran en juego en el fenómeno de la transmisión de calor en puentes de hormigón.

Por otra parte, las distribuciones de tensiones autoequilibradas que se muestran en la figura 3.89 son, como se ha dicho con anterioridad, las correspondientes al instante en el que, para cada una de las secciones analizadas, se alcanza la máxima tracción en el hormigón. No obstante, en base a lo expuesto en el párrafo anterior, no hay que desdeñar nunca la idea de que para otros instantes del día se puedan generar distribuciones tensionales de perfiles sensiblemente opuestos a los mostrados en la figura en los cuales la máxima tracción en el hormigón sea, prácticamente, de la misma magnitud.

A modo de resumen, de los resultados obtenidos en este estudio paramétrico se derivan las siguientes conclusiones:

- No se observan diferencias significativas entre las distribuciones de temperaturas y tensiones longitudinales autoequilibradas obtenidas para cada una de las relaciones espesor ala superior-alma. En cualquier caso, si las diferencias son algo más acusadas éstas son debidas a los cambios experimentados por las características geométricas -posición del centro de gravedad, área y momentos de inercia- y por lo tanto no son función directa del valor adoptado por la relación de espesores.
- A medida que aumenta el espesor de alma menor es el rango de variación diaria de la temperatura media de la sección y menor es la temperatura media máxima.
- La influencia de la relación de espesores ala superior-alma sobre la evolución del gradiente térmico y sobre los máximos alcanzados por dicha acción térmica es prácticamente nula.
- Se aprecian diferencias notables entre la temperatura del aire de la célula y el ambiente exterior, diferencias que se hacen algo más acusadas a medida que el espesor de las almas va disminuyendo.

En general puede concluirse que la relación de espesores analizada tiene poca incidencia en la respuesta térmica y tensional según la dirección de la directriz de la pieza. Sin embargo, realizando un estudio de flexión transversal del tablero, se observa que dicha relación sí tiene alguna incidencia apreciándose que puentes cajón con almas de pequeño espesor se encuentran en condiciones más desfavorables con respecto a la sollicitación térmica transversal puesto que las diferencias de temperatura entre el interior del cajón y el ambiente exterior son algo más acusadas (figura 3.87.b).

Relación longitud de voladizo-canto del alma

El estudio paramétrico referente a esta relación geométrica tiene por objetivo fundamental el visualizar y cuantificar la influencia de la longitud de los voladizos sobre la radiación solar incidente en los paramentos laterales exteriores de las almas y, por lo tanto, sobre las acciones térmicas, especialmente, el gradiente térmico transversal. Para ello se han llevado a cabo los análisis térmicos y tensionales correspondientes a las tres secciones que se muestran en la figura 3.90.

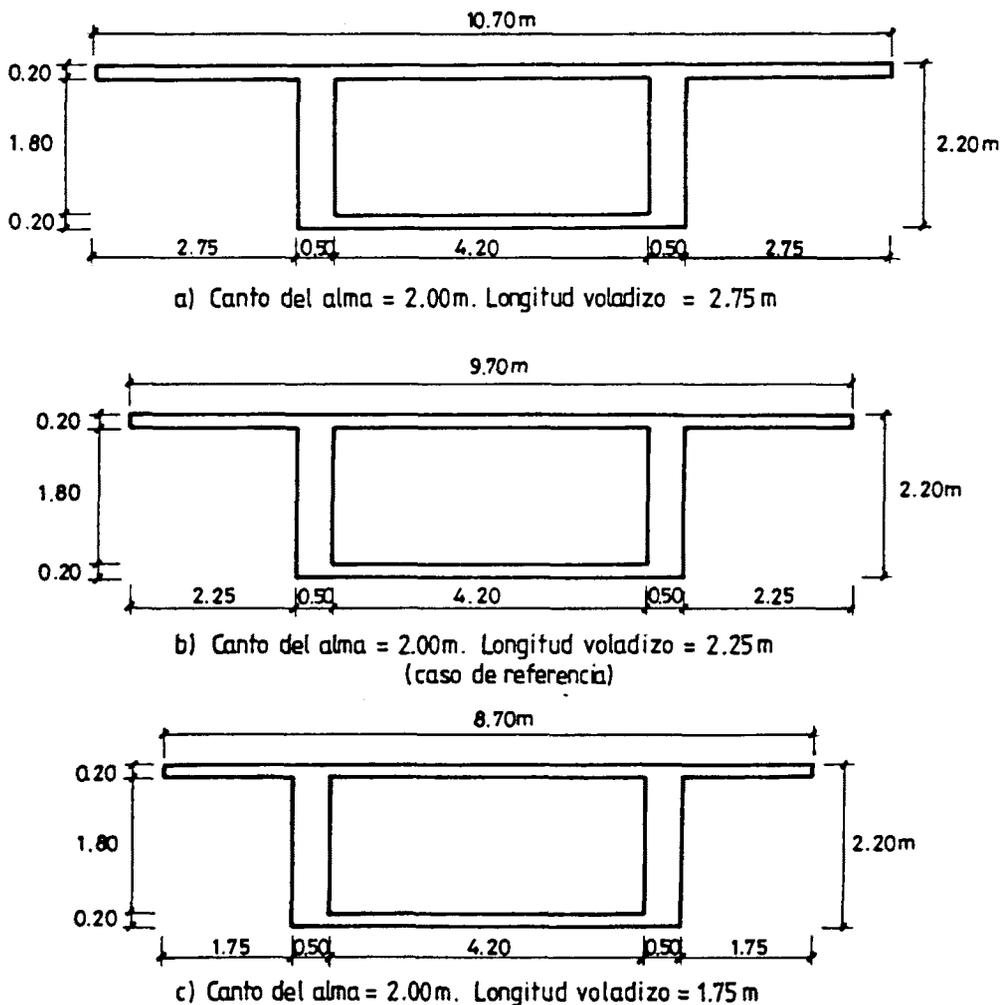


Fig. 3.90.- Secciones transversales analizadas en el estudio paramétrico de la relación longitud del voladizo-canto del alma.

La influencia de dicha relación sobre las distribuciones de temperaturas y de tensiones autoequilibradas longitudinales no es acusada. Ello se puede apreciar de forma clara en la figura 3.91, en donde se muestran las distribuciones térmicas y tensionales según diversos ejes verticales correspondientes al instante para el cual se inducen las máximas curvaturas térmicas verticales impuestas.

Las diferencias que puedan observarse son debidas, al igual que ocurría al analizar la relación de espesores ala-alma, a los cambios experimentados por las características geométricas de la sección y a que, en el caso de que la longitud del voladizo sea de 1.75 metros, el máximo gradiente térmico vertical positivo tiene lugar a las 15.50 horas mientras que en los otros dos casos dicho gradiente se alcanza a las 16.00 horas.

Las figuras 3.92.a y 3.92.b muestran las evoluciones diarias del gradiente térmico vertical y de la temperatura media de la sección para las diferentes longitudes de voladizo analizadas.

En dichas figuras puede observarse que las variaciones existentes entre las evoluciones diarias del gradiente térmico vertical y de la temperatura media de la sección para cada una de las secciones transversales contempladas son mínimas si bien los rangos de variación u oscilaciones diarias de ambas funciones son ligeramente mayores cuanto mayor es la longitud de los voladizos.

Asimismo, también puede apreciarse un aumento de los gradientes térmicos verticales máximos a medida que aumenta la longitud de los voladizos debido a la influencia que tiene un aumento de la temperatura de dichas zonas de la sección como consecuencia directa de la radiación solar incidente sobre el valor que adquiere el gradiente térmico vertical de la sección.

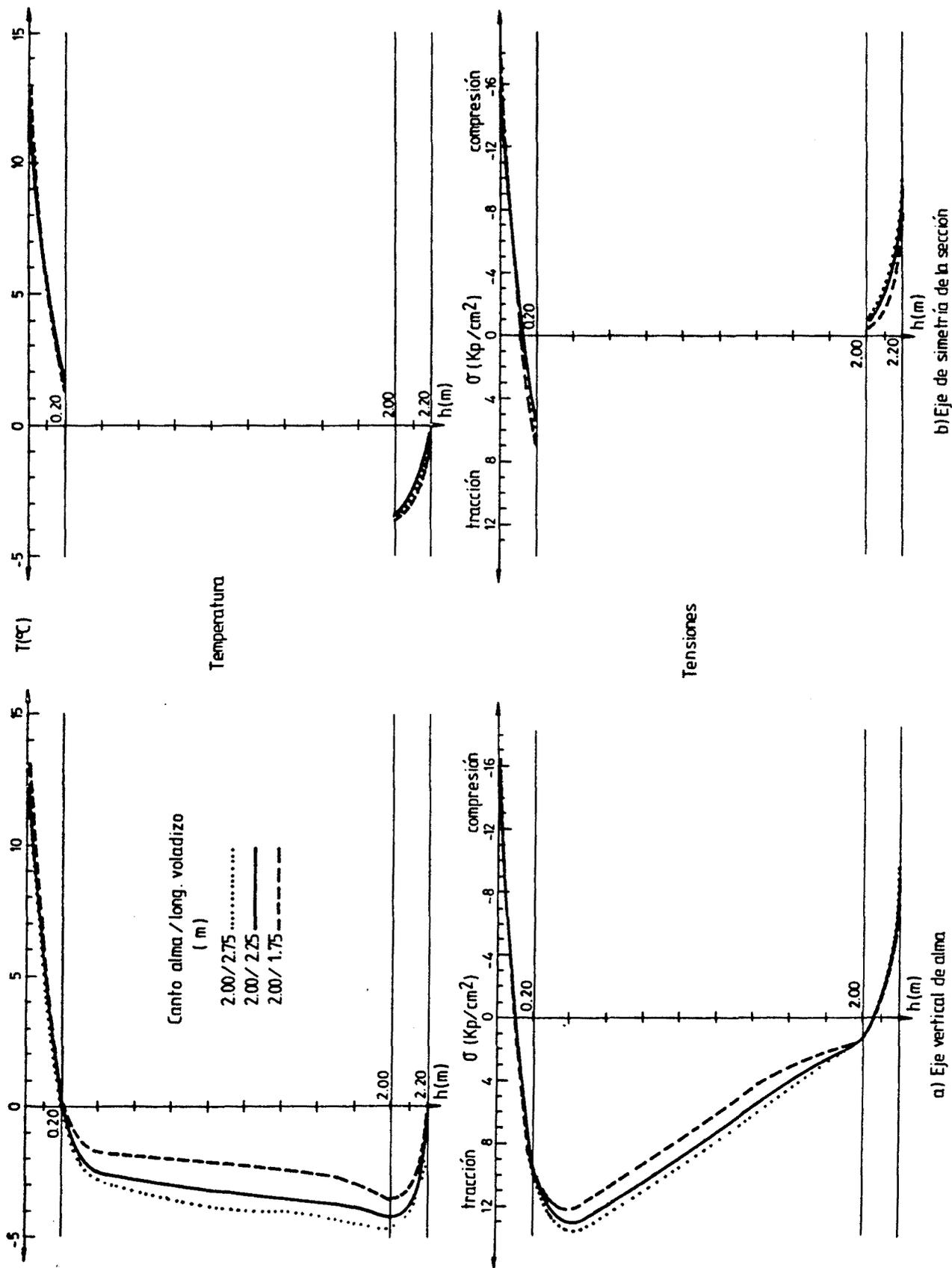


Fig. 3.91.- Distribuciones de temperaturas y tensiones en la sección cajón correspondientes a instantes de máximo gradiente térmico para diferentes relaciones canto del alma-longitud del voladizo.

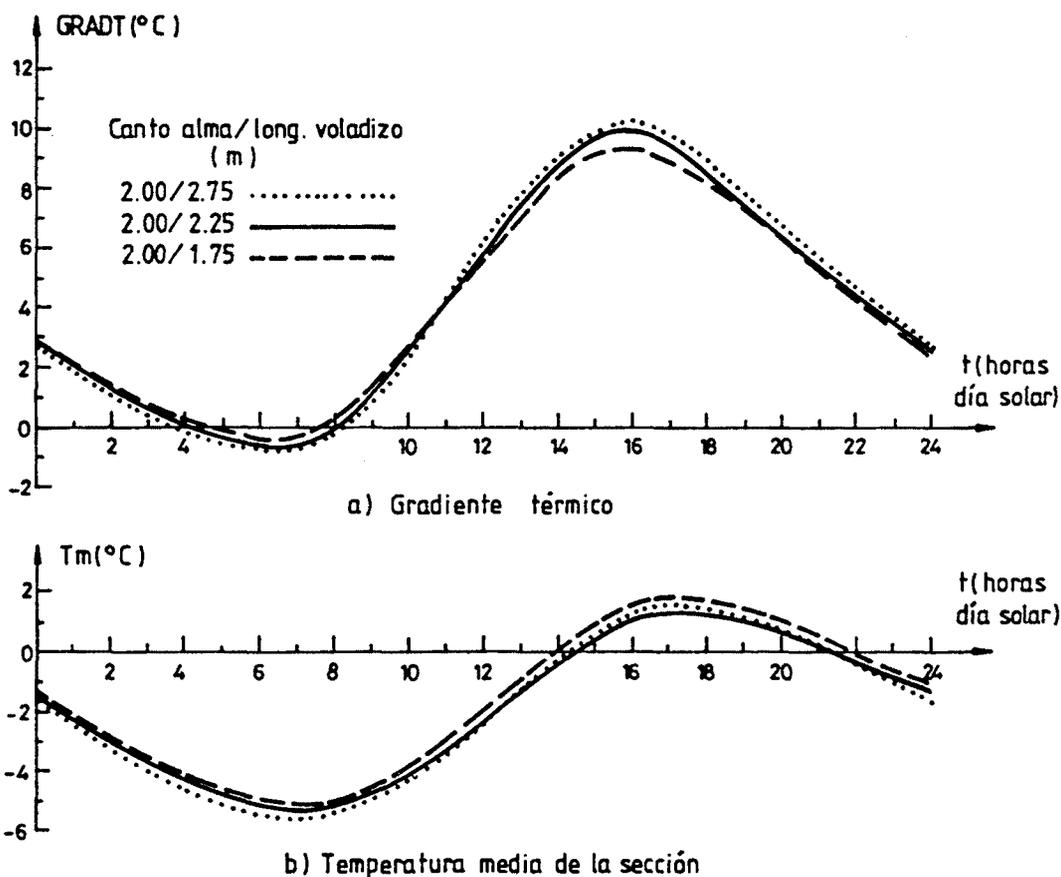


Fig. 3.92.- Evolución diaria del gradiente térmico vertical y de la temperatura media de la sección para diferentes relaciones canto del alma-longitud del voladizo.

Las evoluciones diarias de la temperatura del aire de la célula y de la diferencia de temperaturas entre el interior de la célula y el ambiente exterior para cada una de las relaciones canto del alma-longitud del voladizo analizadas pueden contemplarse en las figuras 3.93.a y 3.93.b respectivamente. De ambas figuras se desprende que la influencia de la longitud de los voladizos sobre la temperatura de la célula es prácticamente nula, como era de esperar. En cualquier caso, las pequeñísimas variaciones que puedan apreciarse serán debidas a la posible incidencia de radiación solar sobre los paramentos laterales exteriores de las almas, hecho que ocurrirá con mayor probabilidad cuanto menor sea la longitud de los voladizos de la sección cajón.

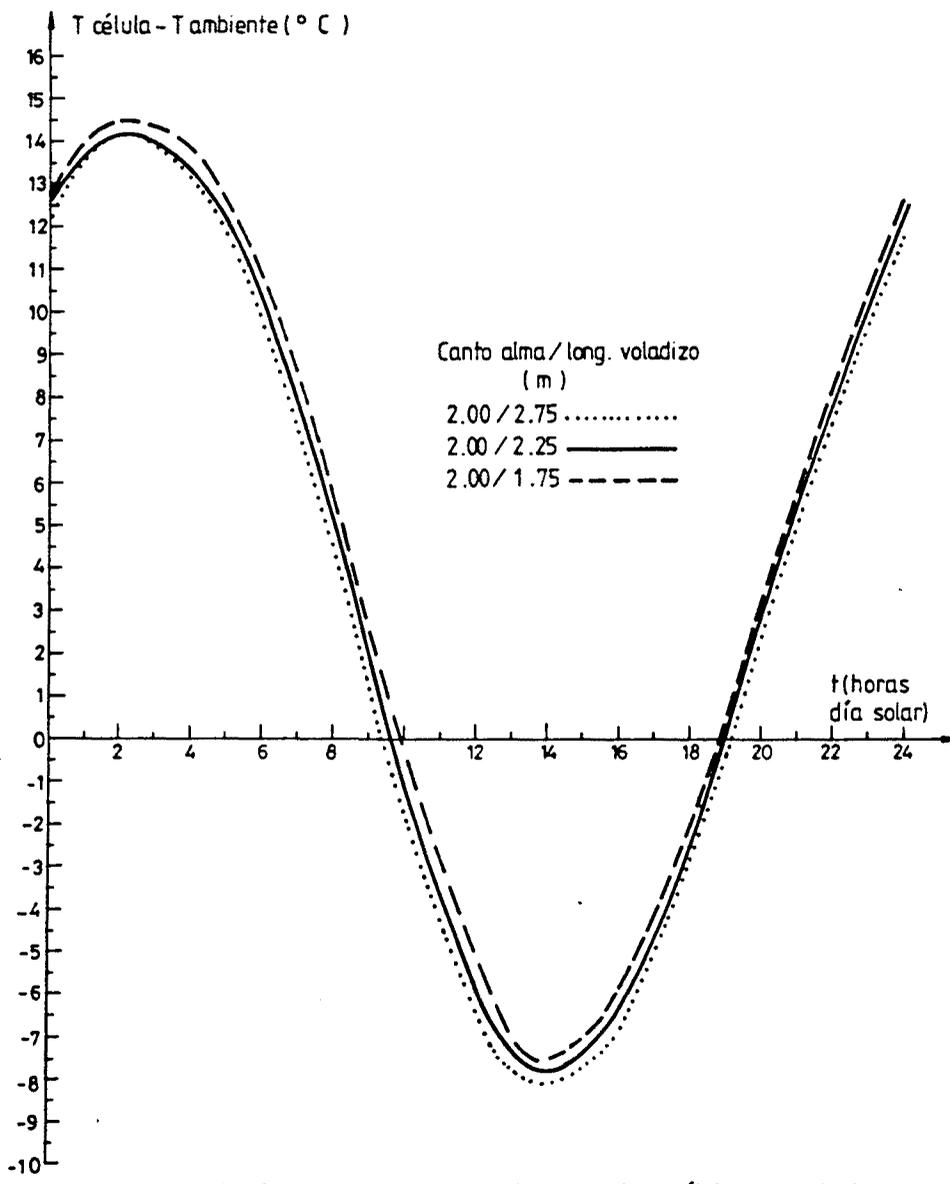
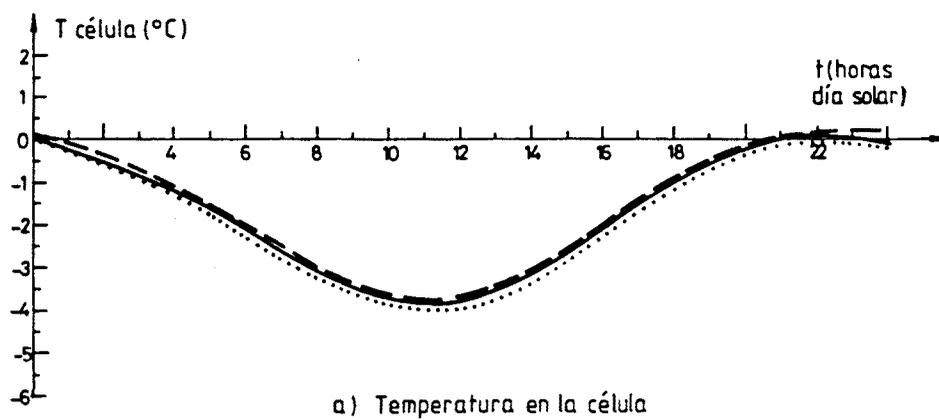


Fig. 3.93.- Evolución diaria de la temperatura del aire de la célula y de la diferencia de temperaturas entre ésta y el ambiente exterior para diferentes relaciones canto del alma-longitud del voladizo.

En la figura 3.94 puede observarse la influencia de la relación longitud del voladizo-canto del alma sobre los gradientes térmicos verticales máximos y sobre los incrementos relativos de temperatura media de la sección.

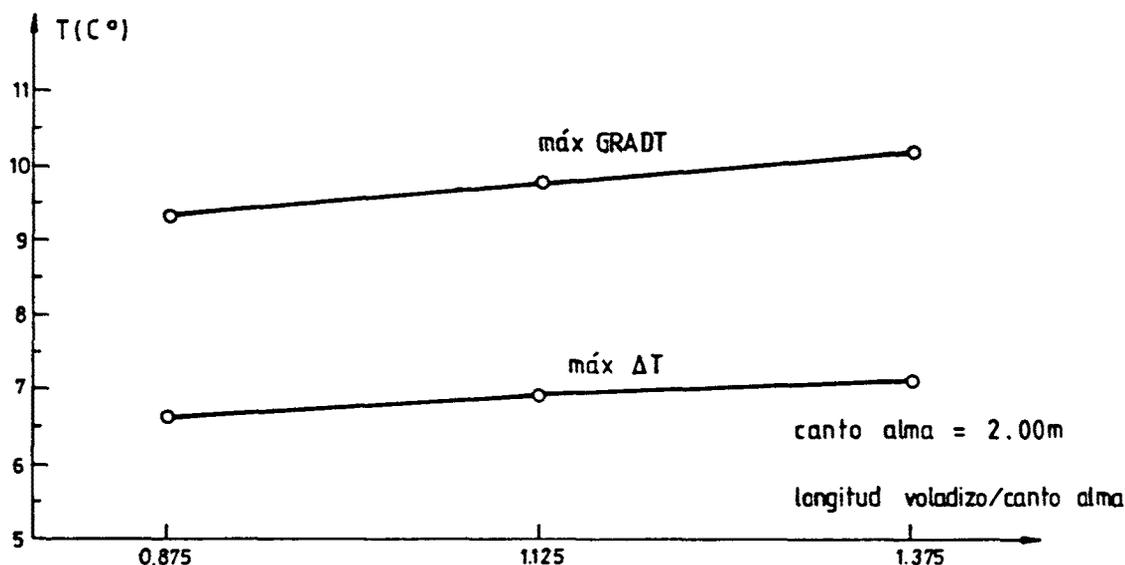


Fig. 3.94.- Influencia de la relación longitud del voladizo-canto del alma sobre los máximos gradientes térmicos verticales y los incrementos relativos de temperatura media de la sección.

En ambas gráficas se observa que cuanto mayor es la longitud del voladizo mayores son los gradientes térmicos verticales máximos y los incrementos relativos de temperatura media.

La figura 3.95 muestra la evolución de los gradientes térmicos transversales en función de la relación longitud del voladizo-canto del alma así como los máximos alcanzados por dicho gradiente para cada una de las secciones analizadas.

En las gráficas presentadas en esta figura queda reflejada de forma clara la influencia de la longitud del voladizo sobre el gradiente térmico transversal. Así, para el caso en el que la longitud del voladizo es de 2.75 metros, és-

te proyecta sombra sobre todo el paramento lateral exterior del alma no existiendo en ningún instante del día radiación solar incidente sobre el alma. Para los otros casos analizados existe radiación solar incidente sobre las almas siendo el tramo que recibe tal radiación mayor cuanto menor sea la longitud del voladizo. De ahí que la magnitud de los gradientes térmicos transversales máximos aumente a medida que la longitud del voladizo disminuye.

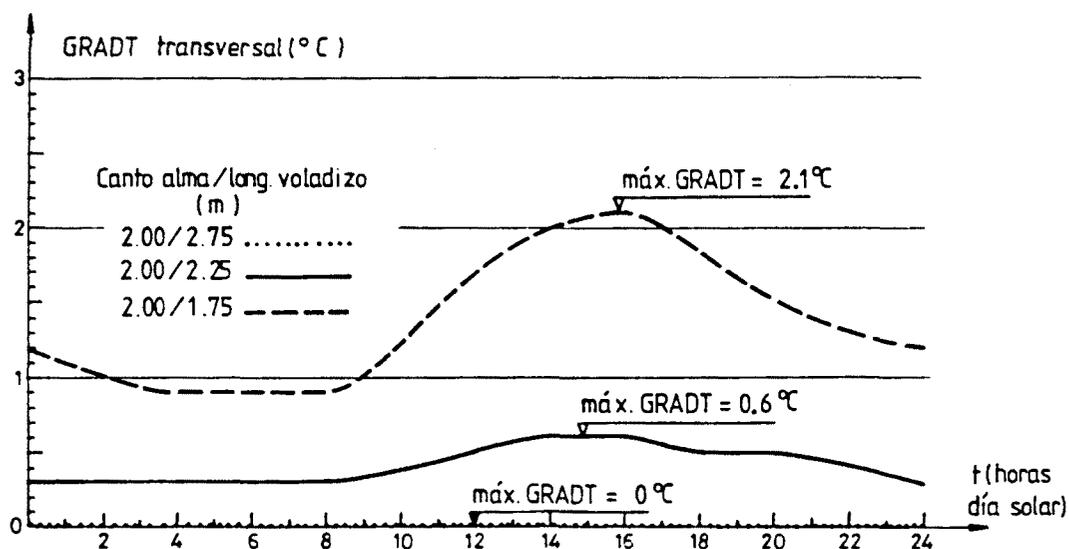


Fig. 3.95.- Evolución diaria de los gradientes térmicos transversales e influencia de la relación longitud del voladizo-canto del alma sobre los gradientes transversales máximos.

La figura 3.96 muestra las distribuciones de tensiones longitudinales autoequilibradas existentes según diversos ejes verticales de la sección en función de la relación canto del alma-longitud del voladizo adoptada en cada caso. Tales distribuciones corresponden a los instantes en los que se genera la máxima tensión de tracción en el hormigón.

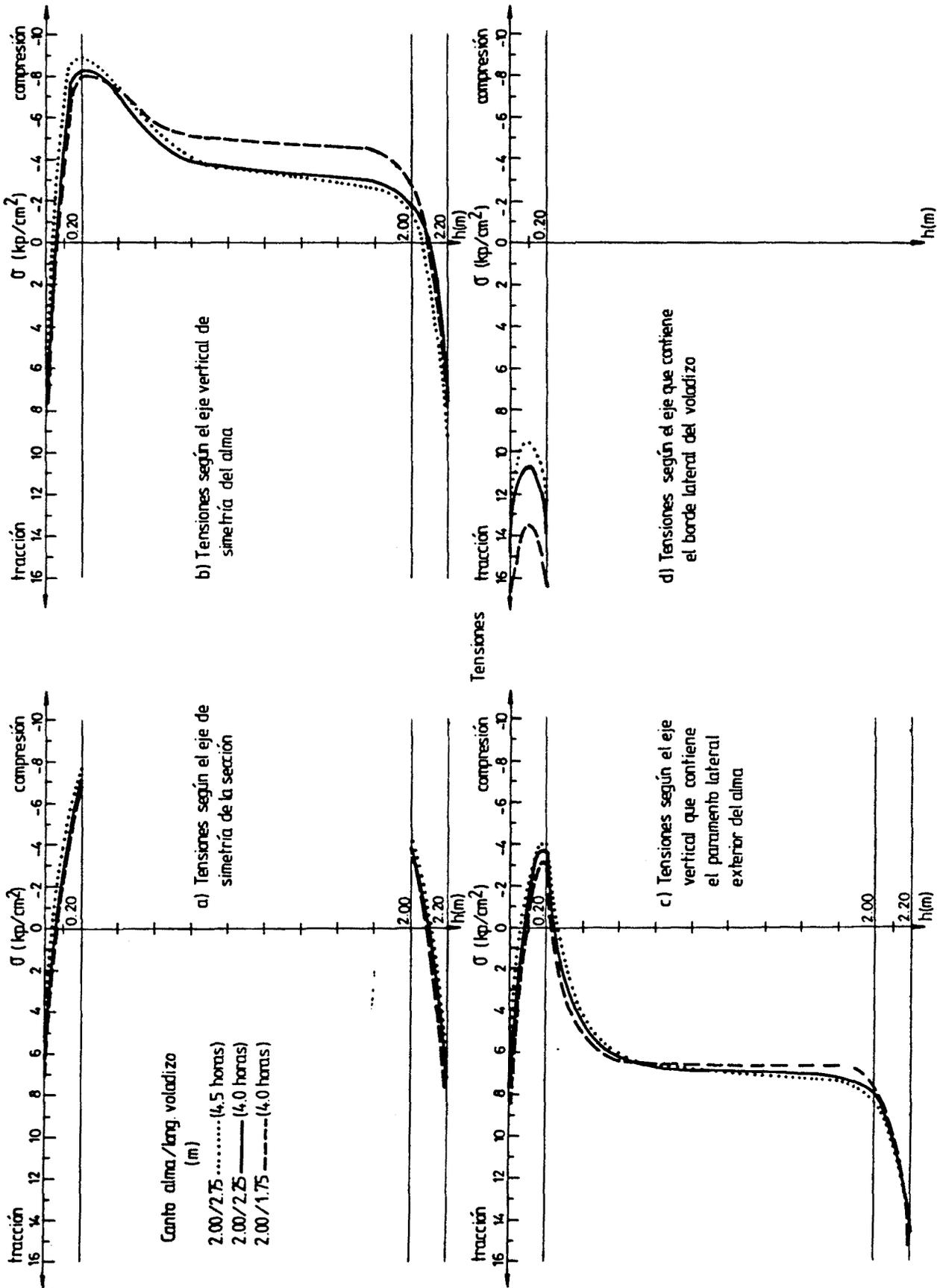


Fig. 3.96.- Distribuciones de tensiones autoequilibradas longitudinales correspondientes al instante en el que se genera la máxima tracción en el hormigón para diferentes relaciones canto del alma-longitud del voladizo.

En las gráficas presentadas en esta figura se observa que las diferencias existentes entre las distribuciones de tensiones son mínimas y vienen originadas, fundamentalmente, por los cambios en los valores de la posición del centro de gravedad, área y momentos de inercia de la sección.

No obstante, en la sección analizada con una longitud de voladizo de 1.75 metros la influencia de la radiación solar incidente sobre los paramentos exteriores de las almas acentúa la no linealidad de la distribución de temperaturas según la dirección transversal de la sección, traduciéndose ello en un aumento de magnitud de las tensiones autoequilibradas longitudinales de los paramentos exteriores y, sobre todo, de los bordes laterales de los voladizos (figura 3.96.d).

Como resumen, de los resultados derivados del estudio paramétrico relativo a la relación canto del alma-longitud del voladizo pueden extraerse las siguientes conclusiones:

- Las diferencias existentes entre las distribuciones de temperaturas y tensiones longitudinales autoequilibradas correspondientes a cada una de las secciones analizadas son mínimas, siendo éstas originadas por los diferentes valores de las características geométricas de la sección -posición del centro de gravedad, área y momentos de inercia- y por la posible incidencia de radiación solar en los paramentos exteriores de las almas de secciones cajón con voladizos de pequeña longitud.
- Cuanto mayor es la longitud de los voladizos mayores son los gradientes térmicos verticales máximos y los incrementos relativos de temperatura media de la sección así como los rangos de variación diaria de ambas acciones térmicas.

- Cuanto menor es la longitud de los voladizos mayor importancia cobra el gradiente térmico transversal apreciándose un aumento considerable de los máximos de dicha acción térmica a medida que la longitud de los voladizos es menor.
- Las diferencias de temperatura entre el interior de la célula y el ambiente exterior son notables manteniéndose en la práctica constantes independientemente del valor adoptado por la relación canto del alma-longitud del voladizo.

Así pues, como resumen de los resultados obtenidos en este estudio paramétrico, cabe destacar el hecho de que cuanto menor es la longitud de los voladizos menor es la superficie en sombra de las almas apreciándose claramente un aumento de los gradientes térmicos transversales y, en concreto, de los máximos. Sin embargo, el disponer voladizos de pequeña longitud no siempre es desfavorable desde un punto de vista térmico ya que, en este caso, se reducen los gradientes térmicos verticales y los incrementos relativos de temperatura media de la sección, tanto diarios como anuales.

Variación del canto de la sección en puentes de inercia variable

En primer lugar, es constatable desde un punto de vista teórico que para luces importantes el peso propio del tablero del puente representa una fracción considerable de la totalidad de la carga a soportar por la estructura. Ello conduce, en general, a adoptar tableros de canto variable, el cual decrece de forma gradual desde los apoyos hacia la clave. Tal transición se consigue mediante la disposición de acartelamientos en las zonas de apoyos o diseñando para el intradós del tablero curvas continuas parabólicas. Por otra parte, la sección cajón es una de las tipologías transversales que mejor se adapta a la construcción de puentes de hormigón pretensado y, en particular, a los construídos por voladizos sucesivos.

Ambas razones nos han llevado a realizar el estudio paramétrico relativo al canto de la sección cajón y al espesor de la losa inferior.

Para ello se han analizado tres secciones transversales de un puente hipotético de hormigón pretensado construído por voladizos sucesivos. La luz de vano se ha supuesto próxima a los 100 metros y las condiciones ambientales y de exposición a las que se ve sometido el puente son las mismas que las adoptadas en el estudio de referencia (tabla 3.7, puente emplazado en Calgary, Canadá, latitud 51.03°N). Asimismo, la sección en clave es la adoptada en este mismo estudio de referencia (figura 3.49 y figura 3.97).

El perfil y sección longitudinal del puente así como las tres secciones transversales a analizar de cara a la obtención de su respuesta térmica y tensional se presentan en la figura 3.97.

Las figuras 3.98 y 3.99 muestran las distribuciones de temperaturas y tensiones longitudinales autoequilibradas correspondientes a los instantes en los que se induce el máximo gradiente térmico vertical positivo para cada una de las secciones analizadas.

A la vista de los resultados presentados en ambas figuras puede decirse que no existen diferencias significativas entre los perfiles de distribuciones térmicas y tensionales. En la figura 3.98 puede apreciarse, no obstante, que la temperatura en el tercio central del eje vertical de simetría del alma permanece prácticamente constante aumentando de valor cuanto mayor es el canto de la sección analizada. Dicha respuesta térmica viene originada por el hecho de que cuanto mayor es el canto, menor es la superficie en sombra de las almas apareciendo así fuentes de calor en el contorno lateral de la sección que hacen que aumente la temperatura en sus proximidades.

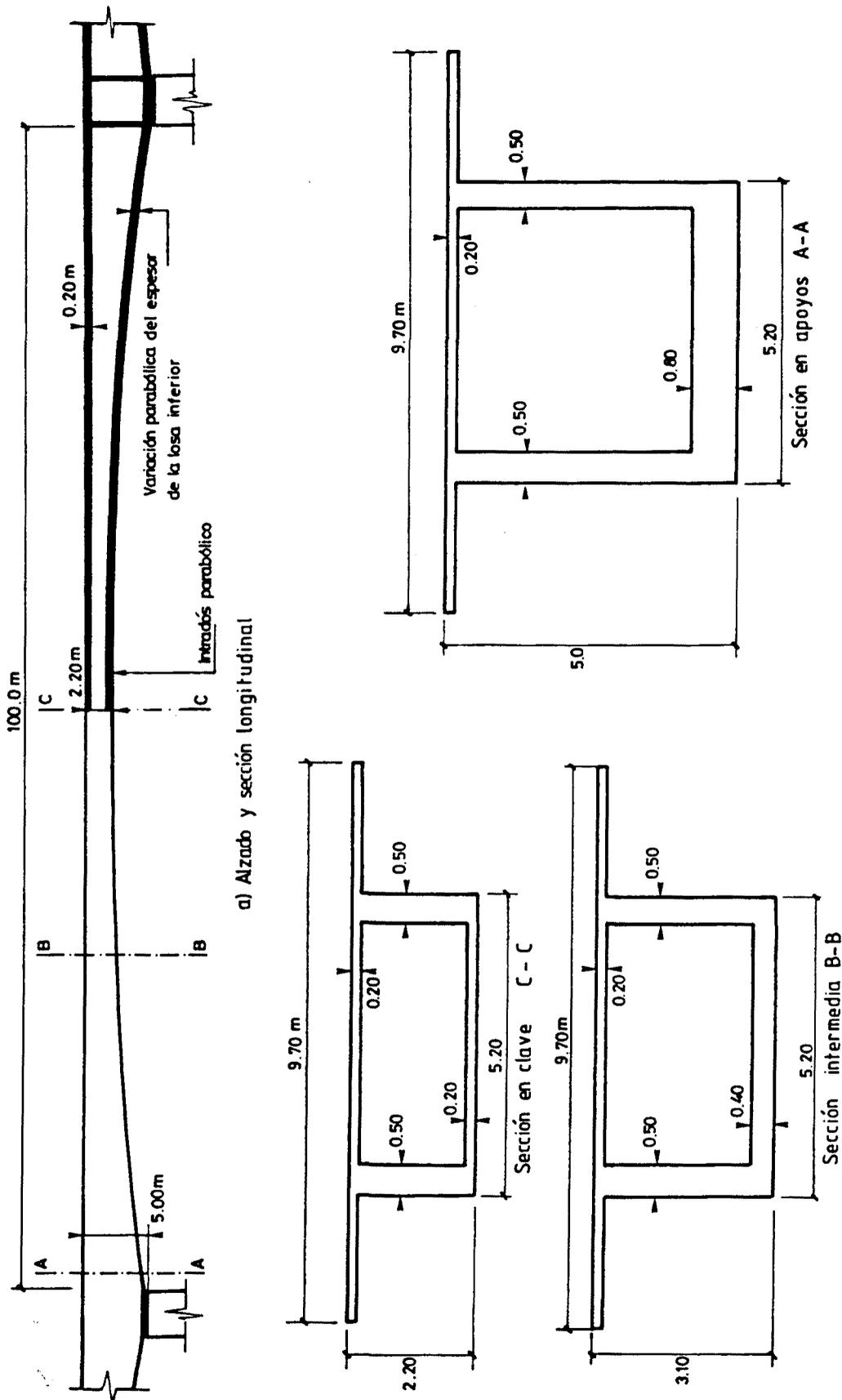


Fig. 3.97.- Alzado y sección longitudinal de un puente de canto variable. Secciones transversales analizadas.

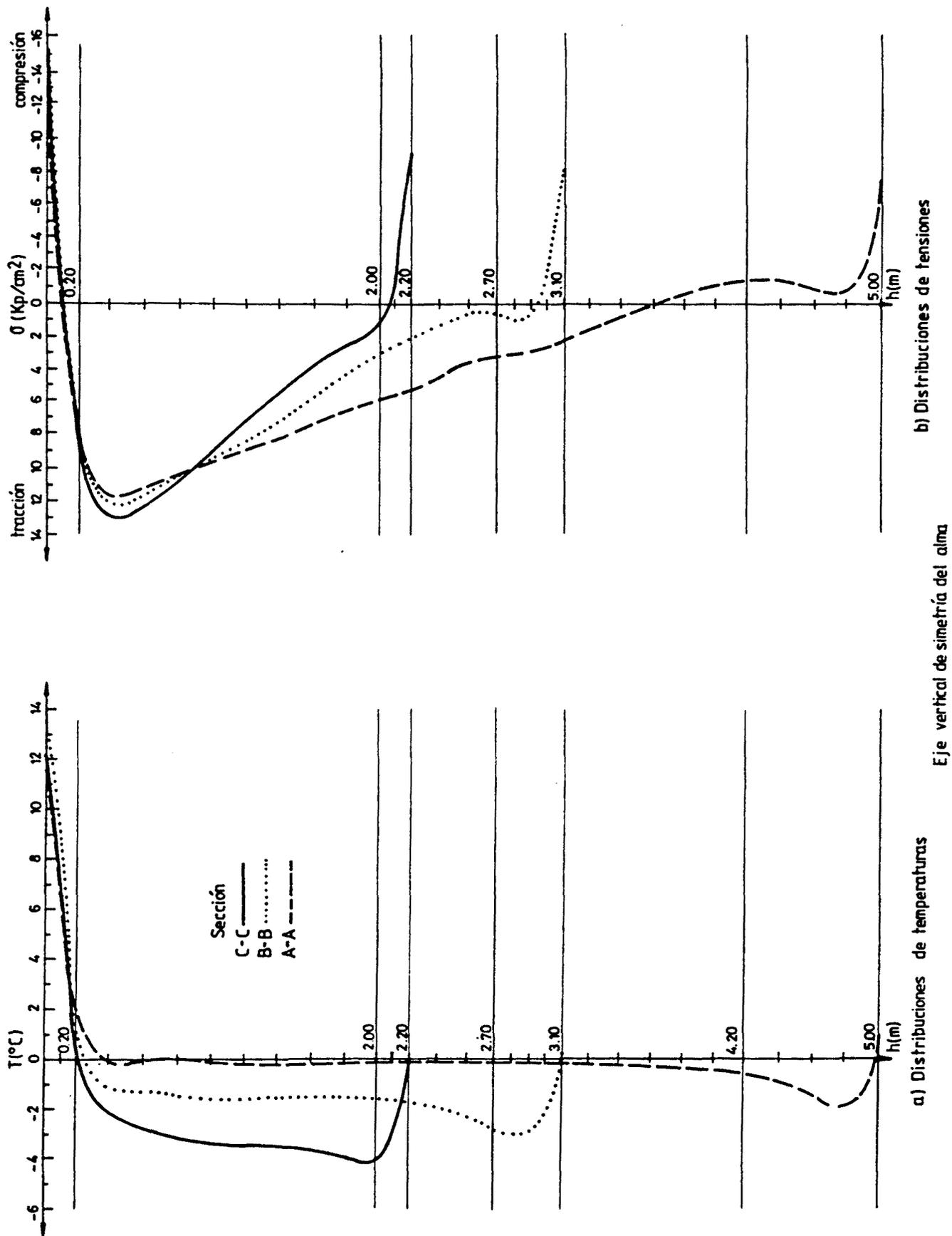


Fig. 3.98.- Distribuciones de temperaturas y tensiones longitudinales auto equilibradas según el eje vertical de simetría del alma correspondientes a instantes de máximo gradiente térmico vertical para las tres secciones analizadas.

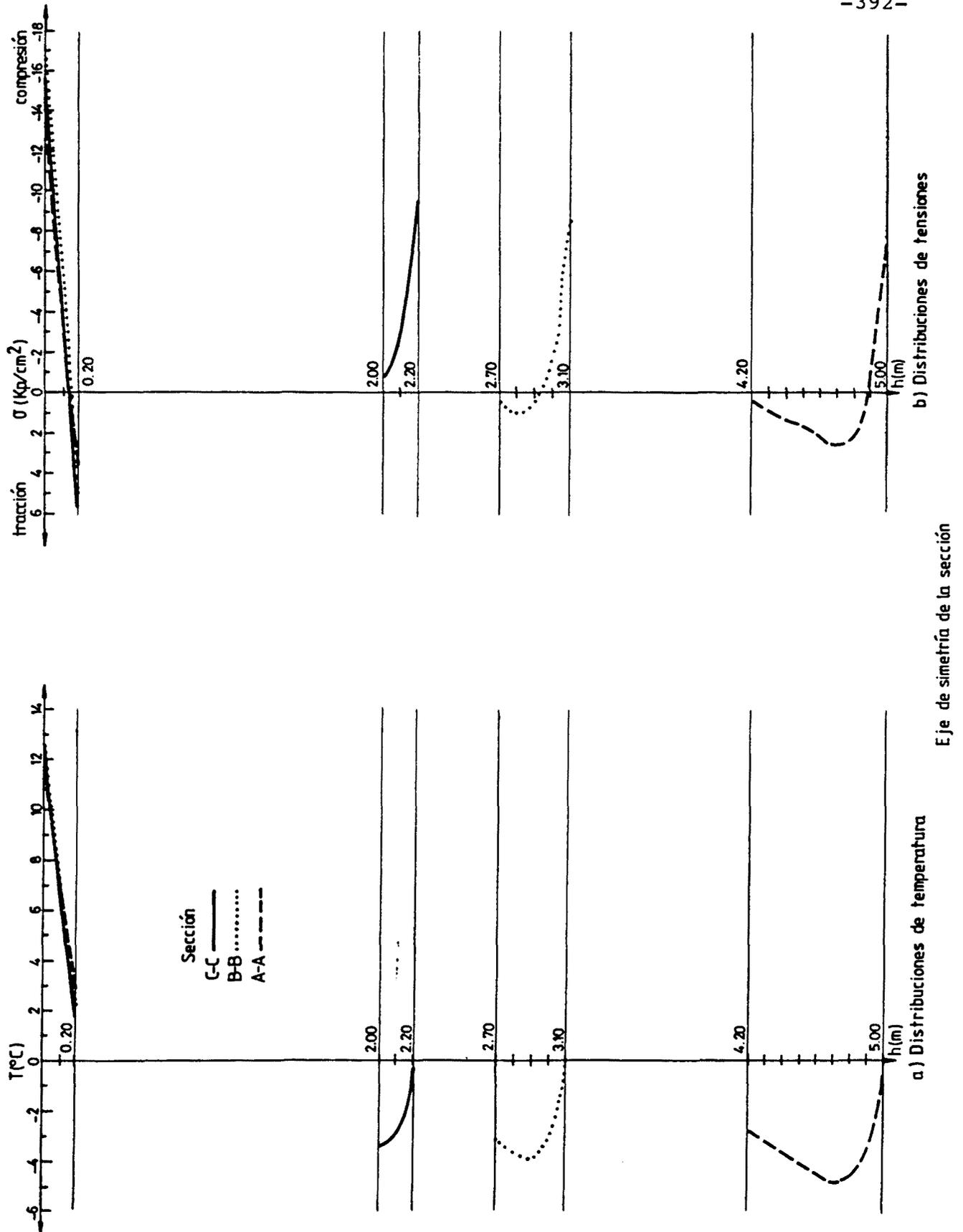


Fig. 3.99.- Distribuciones de temperaturas y tensiones longitudinales auto equilibradas según el eje de simetría de la sección correspondientes a instantes de máximo gradiente térmico vertical para las tres secciones analizadas.

En cuanto a la magnitud de las tensiones longitudinales autoequilibradas, ésta es muy similar en las tres secciones analizadas. Ello no ocurría en el caso de analizar puentes losa maciza puesto que a medida que aumentaba el canto de la losa se obtenían unas tensiones longitudinales autoequilibradas de mayor magnitud. En el caso que nos ocupa -puentes cajón- los cantos son muy elevados con respecto a los que se adoptan en puentes losa maciza y ello hace que el efecto de no linealidad más acusada del campo de temperaturas a medida que aumenta el canto de la sección se vea muy amortiguado.

Las figuras 3.100.a y 3.100.b muestran las evoluciones diarias del gradiente térmico vertical y de la temperatura media de la sección para las diferentes secciones analizadas.

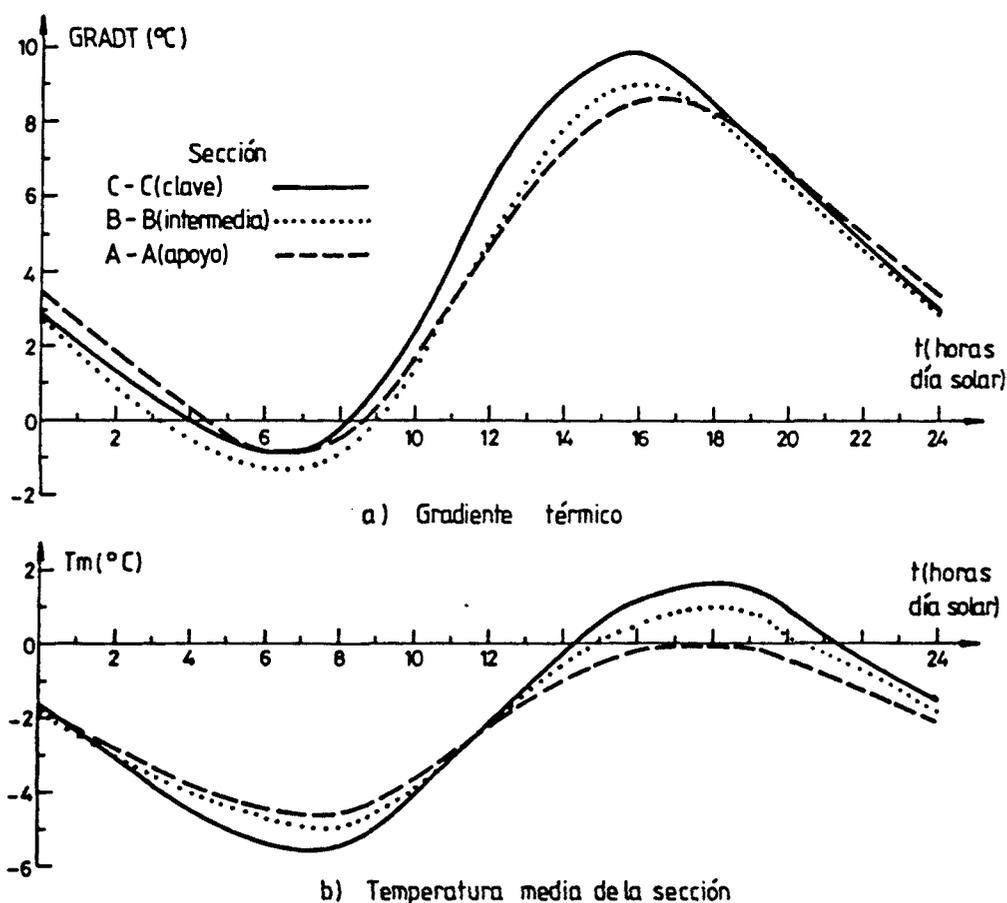


Fig. 3.100.- Evolución diaria del gradiente térmico vertical y de la temperatura media de la sección por las diferentes secciones analizadas.

En ambas figuras puede apreciarse que tanto el gradiente vertical como la temperatura media de la sección siguen, para las tres secciones analizadas, una evolución de tipo periódico muy similar alcanzándose los máximos y mínimos de ambas funciones en los mismos instantes.

Por otra parte, se observa que a medida que aumenta el canto de la sección menores son las temperaturas medias y gradientes térmicos verticales máximos así como los respectivos rangos de variación diaria.

Las evoluciones diarias de la temperatura del aire de la célula y de la diferencia de temperaturas entre el interior de la célula y el ambiente exterior para las diferentes secciones pueden contemplarse en las figuras 3.101.a y 3.101.b respectivamente.

En la primera de dichas figuras puede observarse el desfase temporal de la evolución de la temperatura de la célula con respecto a la de la temperatura media de la sección. En las tres secciones analizadas dicho desfase puede cifrarse en un período de tiempo cercano a las 4 horas. También puede apreciarse que la oscilación diaria de la temperatura del aire de la célula es menor cuanto mayor es el canto de la sección, es decir, cuanto mayor es el volumen de aire encerrado por la célula.

De ahí que, en el caso de secciones próximas a la de clave, la sollicitación térmica transversal inducida por la diferencia de temperaturas existente entre el interior del cajón y el exterior sea ligeramente mayor a la que aparece en secciones próximas a la zona de apoyos sobre las pilas (figura 3.101.b).

La figura 3.102 muestra los valores máximos alcanzados por los gradientes térmicos verticales y los incrementos relativos de temperatura media para las tres secciones analizadas.

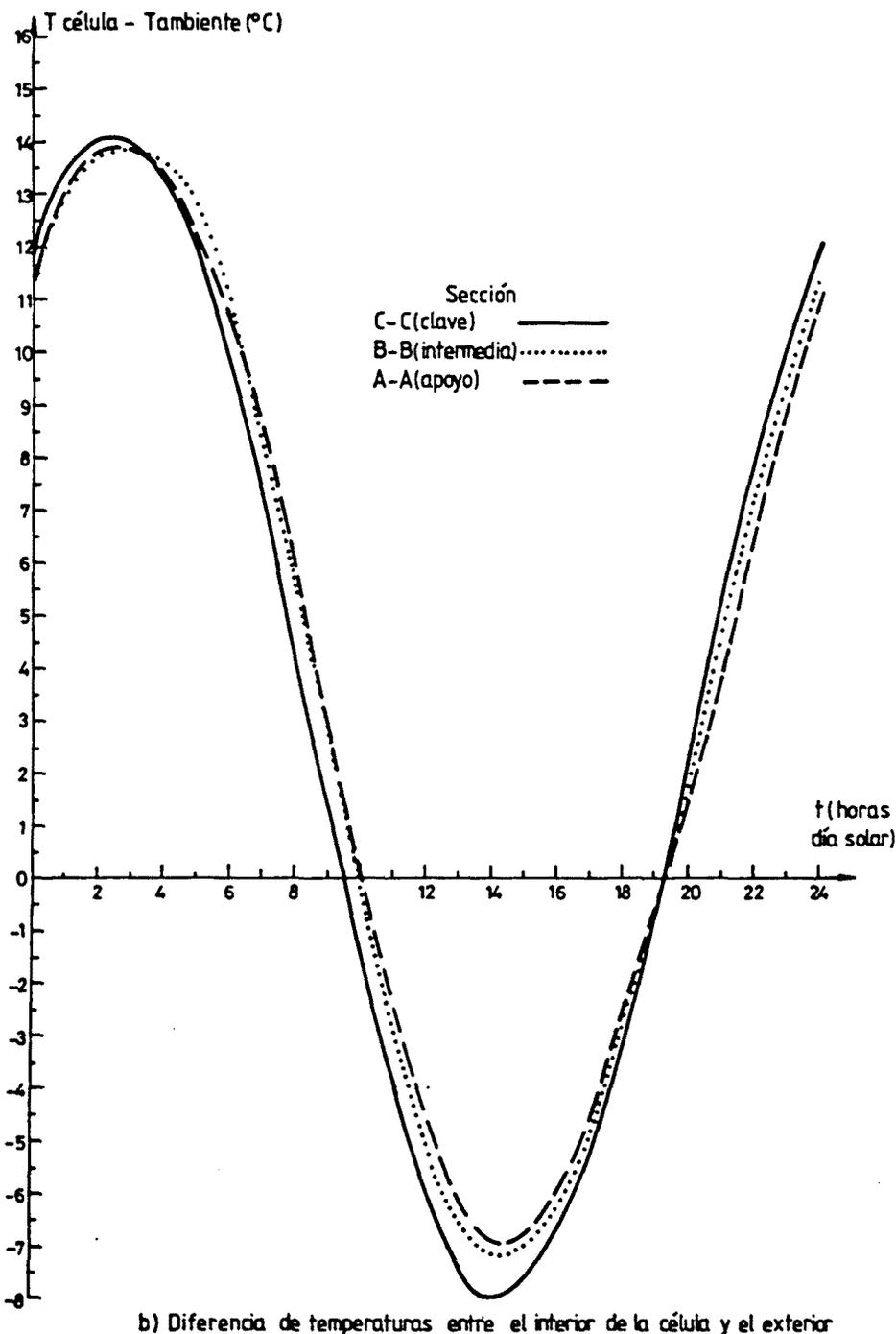
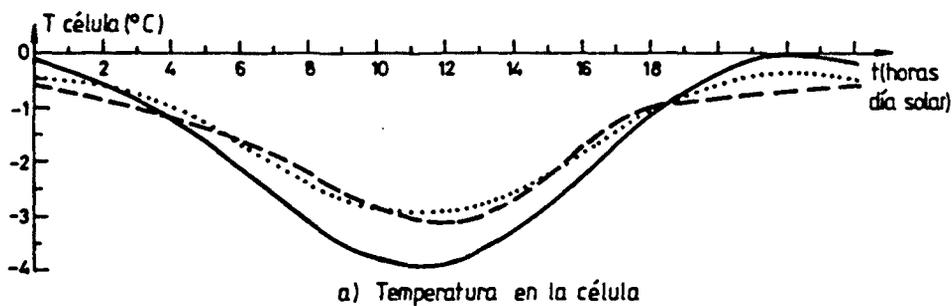


Fig. 3.101.- Evolución diaria de la temperatura del aire de la célula y de la diferencia de temperaturas entre ésta y el ambiente exterior para las diferentes secciones analizadas.

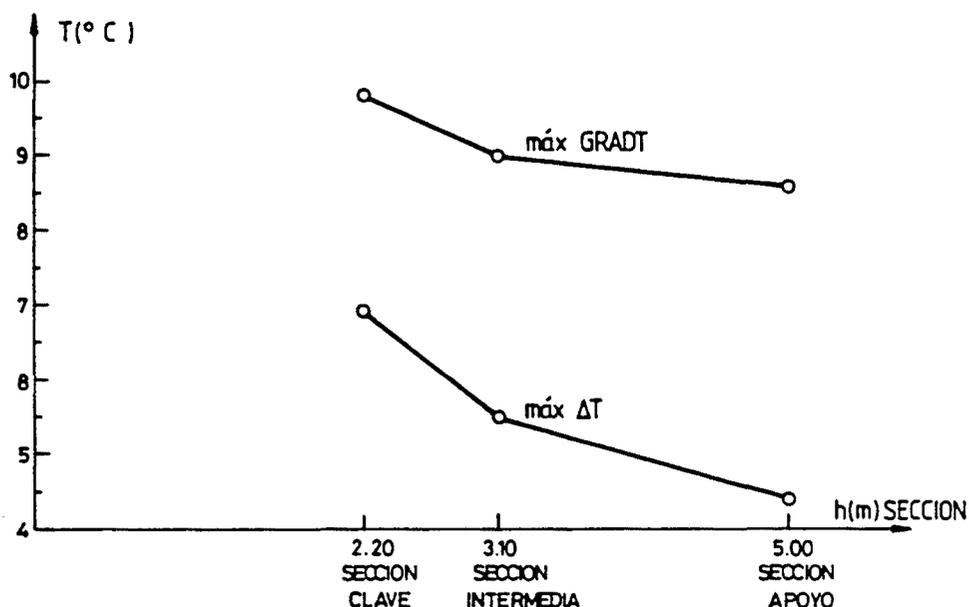


Fig. 3.102.- Influencia del canto y sección sobre los máximos gradientes térmicos verticales y los incrementos relativos de temperatura media.

En ambas gráficas puede apreciarse que en secciones próximas a los apoyos intermedios tanto los gradientes máximos como los incrementos relativos de temperatura media son menores verificándose siempre que la sección crítica frente a la acción térmica ambiental, es decir, aquélla que se ve sometida a los máximos gradientes térmicos y a las máximas expansiones unitarias diarias, es la sección de menor canto (sección de clave).

En lo relativo a los gradientes térmicos transversales puede observarse que éstos adquieren mayor importancia en secciones próximas a los apoyos intermedios. Como se ha comentado con anterioridad, en estas secciones los cantos son muy elevados y, a pesar de que los voladizos arrojan sombra sobre los paramentos exteriores de las almas, éstas se encuentran expuestas a radiación solar en gran parte de su superficie lateral exterior lo que hace que la diferencia de temperaturas entre las almas de la sección cajón sea substancial induciéndose así gradientes térmicos transversales de una magnitud considerable.

En la figura 3.103 se muestra la evolución diaria de los gradientes transversales para cada una de las secciones analizadas así como los máximos gradientes transversales inducidos.

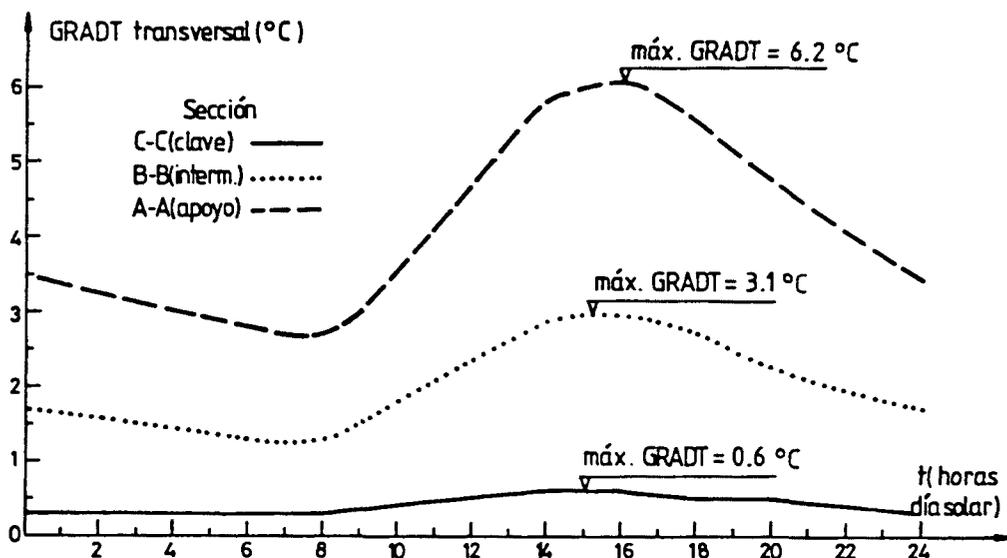


Fig. 3.103.- Evolución diaria de los gradientes térmicos transversales e influencia de la sección y canto de ésta sobre los gradientes transversales máximos.

En dicha figura puede apreciarse que cuanto mayor es el canto de la sección, el gradiente térmico transversal máximo aumenta de forma muy considerable siendo el instante para el cual se generan dichos máximos el mismo para las tres secciones analizadas -las 15.50 horas- y próximo al instante en el que se inducen los máximos gradientes térmicos verticales. Es decir, que los gradientes térmicos máximos según los planos principales de inercia de la sección son concomitantes.

En las figuras 3.104 y 3.105 pueden observarse las distribuciones de tensiones longitudinales autoequilibradas correspondientes a los instantes en que se genera, para cada una de las secciones analizadas, la máxima tracción en el hormigón.

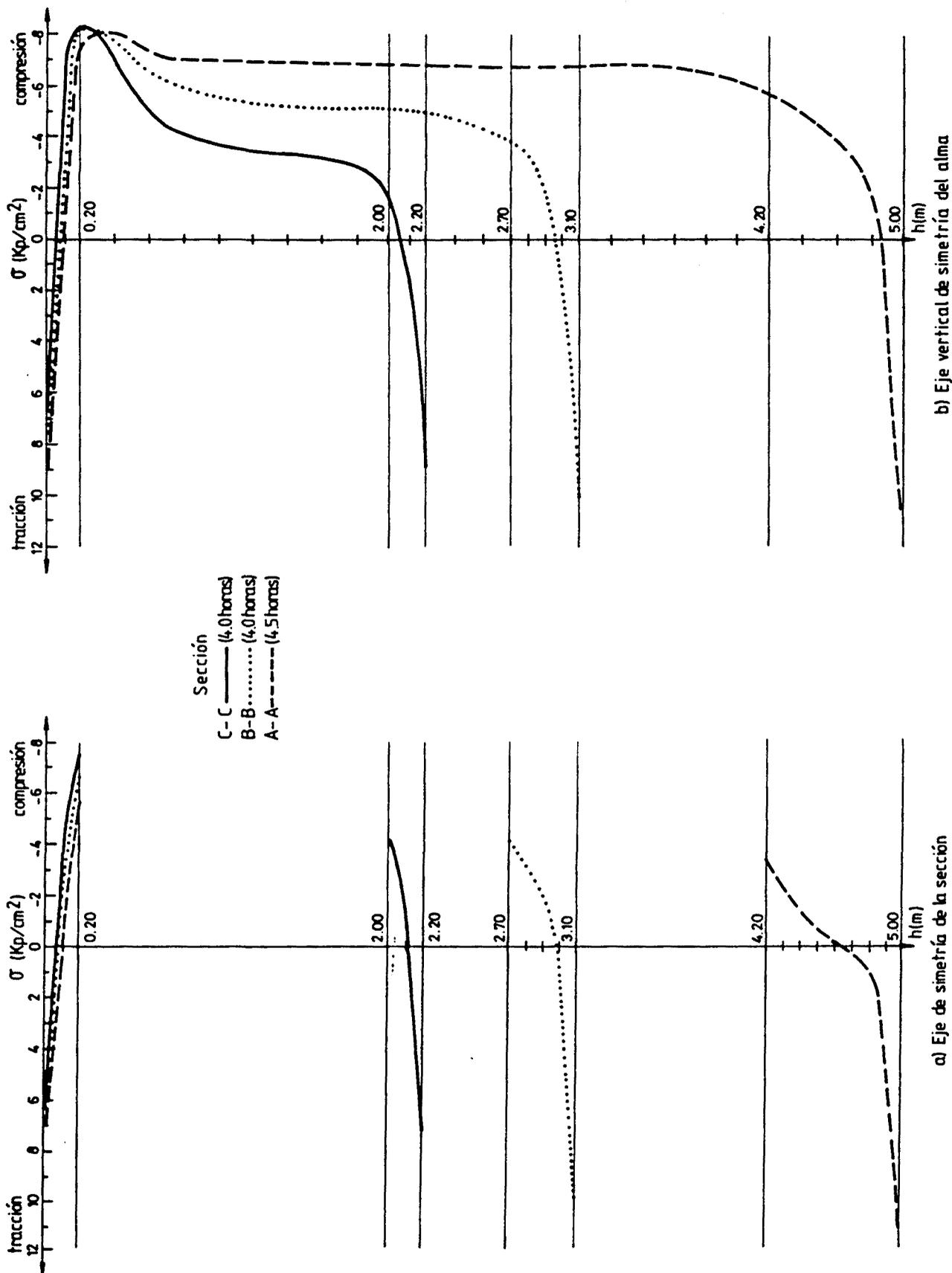


Fig. 3.104.- Distribuciones de tensiones autoequilibradas correspondientes al instante en el que se genera la máxima tracción en el hormigón (eje de simetría de la sección y eje vertical de simetría del alma).

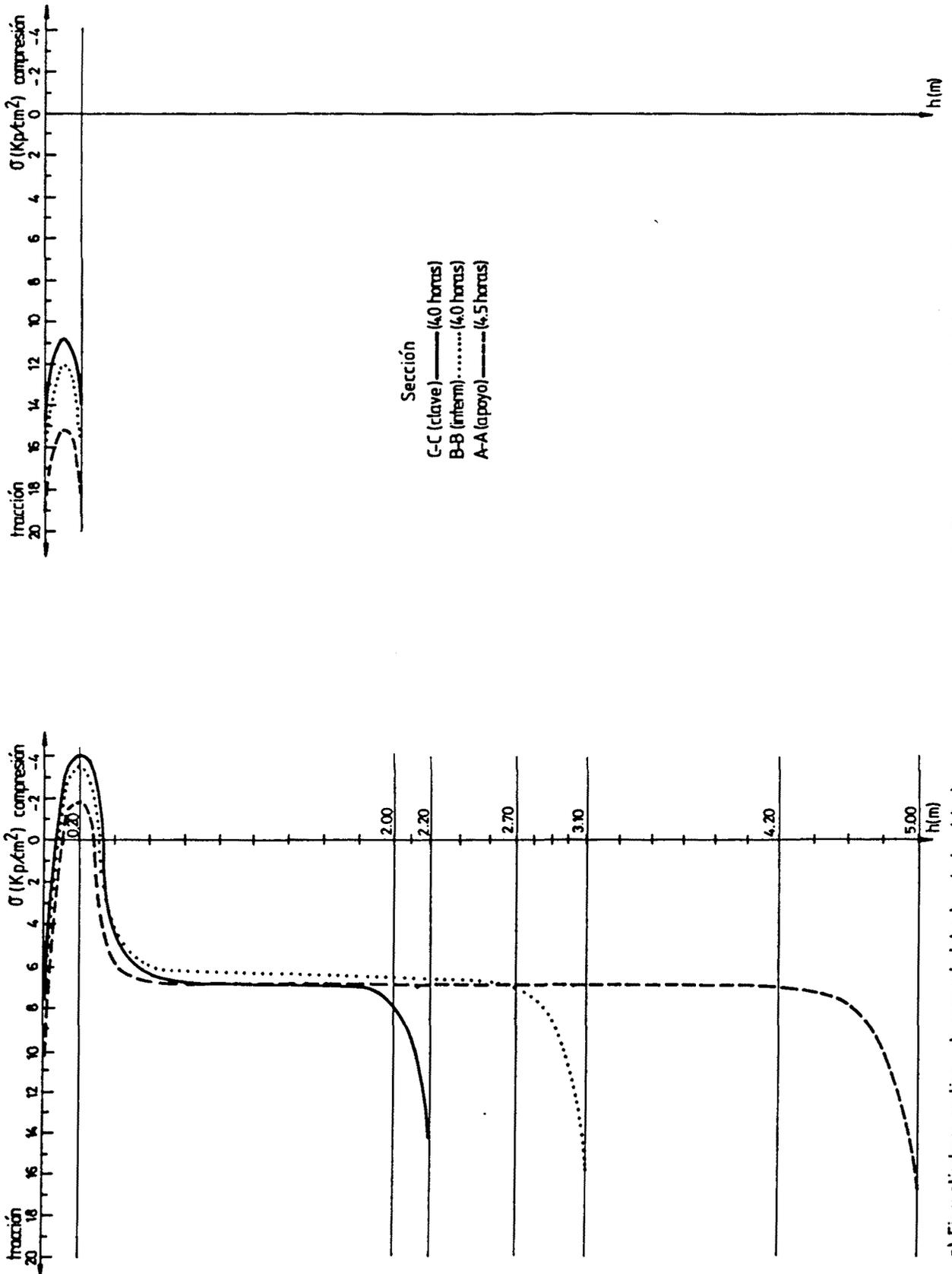


Fig. 3.105.- Distribuciones de tensiones autoequilibradas longitudinales correspondientes al instante en el que se genera la máxima tracción en el hormigón (ejes que contienen el paramento lateral exterior del alma y el borde lateral del voladizo).

El instante para el cual se genera dicha tracción se encuentra comprendido entre las 4 horas y 5 horas de la mañana siendo las zonas próximas a los bordes laterales de los voladizos y los paramentos laterales exteriores de las almas las más traccionadas. En otro instante del día, próximo a las horas de máximo gradiente térmico vertical, aparecen también tracciones considerables en la zona de unión de las almas con el ala superior del tablero (figura 3.98).

En cuanto a la magnitud de las tensiones autoequilibradas puede decirse que ésta no varía substancialmente si bien puede observarse un ligero aumento de dichas tensiones en las secciones cercanas a los apoyos intermedios en los cuales el canto de la sección cajón es muy elevado.

En resumen, del análisis de los resultados obtenidos para las tres secciones analizadas -sección en clave, sección en apoyo y sección próxima a L/4- pueden extraerse las siguientes conclusiones:

- Las distribuciones de temperaturas y de tensiones autoequilibradas correspondientes a cada una de las secciones analizadas muestran, en general, perfiles y magnitudes muy similares. No obstante, en aquellos instantes para los cuales se genera la máxima tracción en el hormigón, la distribución de temperaturas en secciones de elevado canto, próximas a los apoyos intermedios, presenta una no linealidad más acusada lo que implica un aumento de la magnitud de las tensiones autoequilibradas longitudinales, especialmente en las esquinas y bordes laterales de los voladizos.
- Cuanto menor es el canto de la sección mayores son los gradientes térmicos verticales máximos y las temperaturas medias máximas de la sección así como sus respectivos rangos de variación diaria.

- Cuanto mayor es el canto de la sección cajón mayores son los gradientes térmicos transversales debido a que gran parte de la superficie exterior de las almas se ve expuesta a radiación solar.
- La sollicitación térmica transversal, originada por la diferencia de temperaturas entre el interior de la célula y el ambiente exterior, es ligeramente mayor en secciones próximas a la sección de clave. Por otra parte, hay que tener en cuenta que la flexión transversal inducida por esta sollicitación origina momentos de flexión en las almas, los cuales son proporcionales a la rigidez relativa de éstas. Así pues, suponiendo un espesor de almas constante a lo largo de toda la longitud del vano, las tensiones originadas en las almas son mayores cuanto menor es la longitud de éstas, es decir, en secciones próximas a la clave del vano.

Por otra parte, el haber obtenido la respuesta térmica y tensional de tres secciones transversales de un vano de un puente cajón de inercia variable nos permitirá analizar y cuantificar la posible influencia del flujo de calor según la dirección longitudinal del puente.

Es evidente que en puentes de sección constante dicho flujo es prácticamente nulo. Ahora bien, el hecho de que la tipología transversal varíe a lo largo de la directriz del puente, como es el caso que se analiza, puede incidir en la respuesta térmica seccional como resultado de la existencia de un posible flujo térmico longitudinal.

La figura 3.106 muestra la evolución diaria de la temperatura en diferentes nodos de las secciones transversales analizadas. La temperatura reflejada en las gráficas de dicha figura es la que se obtiene en dichos nodos mediante el plano de temperaturas equivalente a la distribución no lineal del campo térmico.

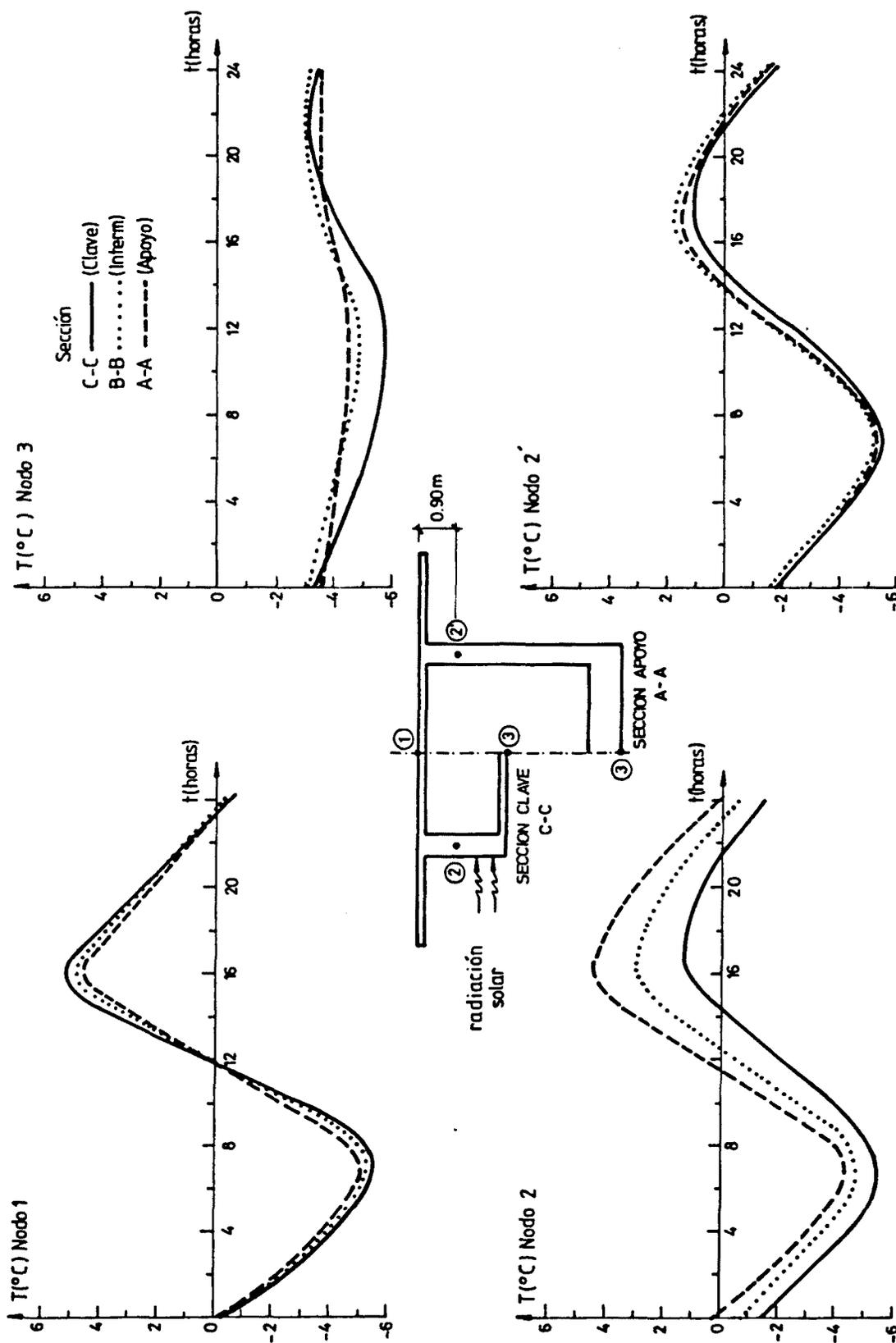


Fig. 3.106.- Evolución diaria de la temperatura en diversos nodos de las tres secciones transversales analizadas.

En todas ellas puede apreciarse que la diferencia de temperaturas existente a lo largo de una misma fibra longitudinal entre la sección de clave y la sección de apoyo, distantes entre sí unos 50 metros, es poco significativa siendo la máxima diferencia del orden de 3 a 4°C. Tal diferencia máxima tiene lugar en aquellas fibras pertenecientes al alma sobre la cual incide radiación solar (véase la evolución de la temperatura en el nodo 2 en la figura 3.106). Para dichas fibras la temperatura es algo más elevada en las secciones cercanas a la zona de apoyos intermedios. De ahí que las líneas de flujo llevarían el sentido de apoyos hacia clave con lo cual un resultado inmediato sería la disminución de gradiente térmico transversal en las secciones próximas a los apoyos y, por lo tanto, una uniformidad a lo largo de la directriz en lo referente a la magnitud de esta acción térmica. No obstante, como se puede constatar en las gráficas presentadas en la figura 3.106, dicho flujo siempre será de poca entidad.

Por consiguiente, puede concluirse que el flujo longitudinal de calor en puentes de hormigón de inercia variable, ya sean puentes losa o puentes cajón, es prácticamente despreciable con lo cual queda contrastada aquí la hipótesis adoptada por todos los investigadores que han estudiado y analizado los efectos térmicos ambientales en puentes de hormigón y que también se ha adoptado en el presente trabajo por la cual la obtención de la respuesta térmica se lleva a cabo a nivel seccional.

Por último, debido a la considerable magnitud de los gradientes térmicos transversales en secciones de apoyos (figura 3.103) -gradientes máximos en torno a los 6°C- y a la alta correlación que muestra esta acción térmica con la latitud del lugar de emplazamiento del puente se ha creído oportuno el llevar a cabo un análisis comparativo entre los resultados obtenidos para el puente cuya tipología longitudinal y transversal se muestra en la figura 3.97, emplazado en

dos latitudes diferentes. La primera de ellas es la correspondiente al estudio básico de referencia de la sección cajón -Calgary, Canadá, latitud 51.03°N - y la segunda es la que corresponde al estudio de referencia de la sección losa maciza -Rubí, provincia de Barcelona, latitud 41.4°N -. Ello permitirá mostrar resultados relativos a gradientes térmicos transversales en puentes emplazados en la Península Ibérica y comprobar si la magnitud de aquéllos puede ser o no despreciable en nuestras latitudes.

Las condiciones de contorno de temperatura ambiente existentes en ambos lugares de emplazamiento así como los resultados obtenidos para las solicitaciones térmicas quedan recogidos en la tabla 3.11. Parámetros como el factor de turbidez, velocidad del viento, azimut y día del año -21 de Marzo- se mantienen constantes en ambos estudios.

Una observación de los resultados presentados en dicha tabla permite afirmar que las diferencias más acusadas son las relativas al valor alcanzado por el gradiente térmico transversal. Se aprecia que cuanto más cercano es el lugar de emplazamiento del puente al Ecuador mayor es la inclinación de los rayos solares con respecto a un plano horizontal tangente a la superficie terrestre y, por consiguiente, mayor es la superficie en sombra de las almas de la sección cajón. De ahí que en latitudes bajas el gradiente térmico transversal sea de menor magnitud.

Así, por ejemplo, la sección de clave en los casos II y III -puente emplazado en Rubí- no recibe radiación solar sobre sus almas mientras que esa misma sección en el caso I -puente emplazado en Calgary- sí la recibe.

| | SOLICITACIONES TERMICAS (°C) | SECCION APOYO canto=5.0m | SECCION INTERMEDIA canto=3.1m | SECCION CLAVE canto=2.2m |
|---|--|--------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|
| Puente en Calgary, Canadá Latitud=51.03°N Temp. amb. max. día=5°C Temp. amb. mín. día=-15°C (caso I) | Máximo gradiente vertical | 8.6 | 9.0 | 9.8 |
| | Máximo gradiente transversal | 6.2 | 3.1 | 0.6 |
| | Incremento relativo diario de temperatura media de sección | 4.4 | 5.5 | 6.9 |
| | Máxima diferencia de temperaturas entre célula y ambiente | 13.8 | 13.7 | 14.1 |
| Puente en Rubí, Barcelona Latitud=41.4°N Temp. amb. max. día=17°C Temp. amb. mín. día=5.4°C (caso II) | Máximo gradiente vertical | 8.3 | 9.6 | 10.7 |
| | Máximo gradiente transversal | 3.8 | 0.8 | 0.0 |
| | Incremento relativo diario de temperatura media de sección | 3.3 | 4.4 | 5.6 |
| | Máxima diferencia de temperaturas entre célula y ambiente | 10.0 | 9.8 | 10.0 |
| Puente en Rubí, Barcelona Latitud=41.4°N Temp. amb. max. día=21.2°C Temp. amb. mín. día=1.2°C (caso III) | Máximo gradiente vertical | 9.0 | 10.2 | 11.2 |
| | Máximo gradiente transversal | 3.8 | 0.8 | 0.0 |
| | Incremento relativo diario de temperatura media de sección | 4.4 | 5.8 | 7.4 |
| | Máxima diferencia de temperaturas entre célula y ambiente | 14.3 | 14.2 | 14.6 |

Tabla 3.11.- Resultados de las distintas solicitaciones térmicas en las tres secciones analizadas para diferentes emplazamientos del puente que se presenta en la figura 3.97.

A pesar de ello, es de interés señalar que puentes cajón emplazados entre las latitudes 36°N y $43^{\circ}47'\text{N}$, latitudes éstas que engloban la Península Ibérica y las Islas Baleares, en los que, en zonas de apoyos, se diseñen secciones con cantos elevados éstas reciben radiación solar sobre sus almas induciéndose de esta forma el consiguiente gradiente térmico transversal que, en algunos casos, puede ser de cierta consideración (en el puente analizado en cuestión el gradiente transversal máximo en la sección de apoyo es de 3.8°C).

Un análisis comparativo de los resultados obtenidos en los casos I y III y en los casos II y III permite visualizar de forma clara la influencia de la latitud y del rango de variación diaria de la temperatura ambiente respectivamente. Se observa, como ya se ha expuesto anteriormente, que latitudes bajas y elevados rangos de variación diaria de la temperatura ambiente inducen mayores gradientes térmicos verticales e incrementos relativos diarios de temperatura media de la sección así como sollicitaciones térmicas transversales de mayor magnitud.

Existencia de cartelas

La disposición de cartelas en la unión de las almas con las alas superior e inferior de la sección cajón atiende a una mejora en el empotramiento de las losas en las almas y a facilitar la operación de hormigonado. En el caso de puentes de hormigón pretensado la existencia de cartelas facilita la disposición de la armadura activa longitudinal y transversal de la losa superior y, en la construcción de puentes por avance en voladizo, la colocación de los anclajes eventuales de las armaduras de solidarización.

Por otra parte, la transición gradual de los espesores de arranque de voladizos y de las losas superior e inferior a los espesores de almas mediante regruesamientos y cartelas mejorará, en líneas generales, el comportamiento de la

sección transversal evitándose de esta forma la presencia de codos y esquinas, zonas éstas de casi siempre elevada concentración de tensiones.

En lo que se refiere a los efectos térmicos ambientales puede decirse que la respuesta térmica y tensional de los puentes cajón según la dirección longitudinal no se ve afectada por la existencia de tales cartelas siendo las variaciones de las acciones térmicas -gradientes térmicos vertical y transversal e incrementos relativos diarios y anuales de temperatura media de la sección- y de las tensiones longitudinales autoequilibradas prácticamente nulas. No obstante, tales variaciones dependerán siempre del volumen de los regruesamientos y cuando éste sea elevado, ello deberá ser contemplado en la obtención de la respuesta térmica a nivel seccional.

Desde el punto de vista de la flexión transversal del tablero la influencia del regruesamiento del espesor de alas y almas en su zona de unión es significativa cara a la respuesta tensional en el plano de la sección.

En efecto, las diferencias de temperatura existentes entre el aire de la célula y el ambiente exterior solicitan transversalmente la sección cajón generándose tensiones de tracción en las fibras exteriores de alas y almas si la temperatura en el interior es mayor que en el exterior y tracciones en las fibras interiores si ocurre lo contrario.

Para evaluar dichas tensiones analicemos el marco cajón, doblemente simétrico, que se presenta en la figura 3.107.

Al ser el marco perfectamente simétrico ninguno de los nudos gira comportándose cada elemento barra que conforma la estructura como una viga biempotrada de inercia variable sometida a un gradiente de temperaturas $\Delta T = T_i - T_e$.

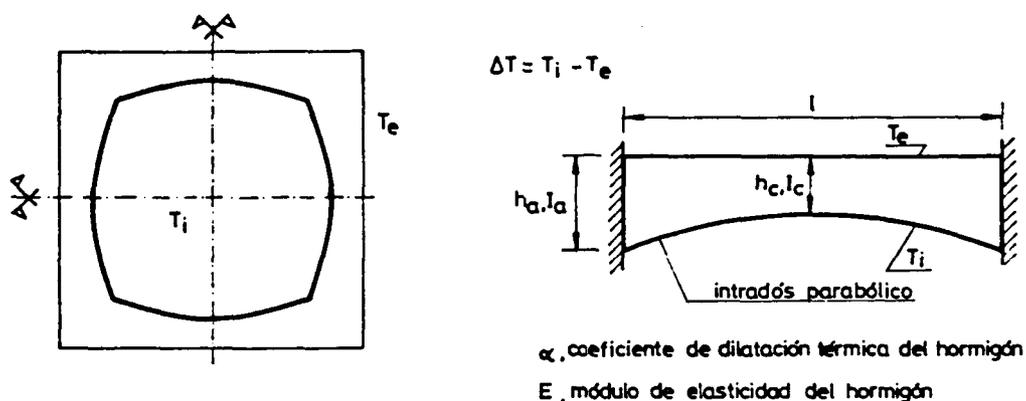


Fig. 3.107.- Marco cajón analizado para la obtención de las tensiones térmicas transversales al existir una diferencia de temperaturas entre el interior de la célula y el ambiente exterior.

El analizar dicha estructura mediante un cálculo lineal nos permite aplicar el principio de superposición y obtener los momentos que deben actuar en extremos de barra para que los giros en dichos extremos, originados por la acción térmica, sean idénticamente nulos.

El giro originado en un extremo de una viga biapoyada de inercia variable sometida a un gradiente térmico viene definido por la siguiente integral

$$\theta = \alpha \cdot \Delta T \int_0^{l/2} \frac{dx}{h(x)} \quad |3.1|$$

Suponiendo un intradós parabólico, se resuelve la integral y se obtiene para θ el siguiente valor

$$\theta = \frac{\alpha \cdot \Delta T \cdot l}{2h_c} \frac{\arctg \sqrt{\frac{h_a}{h_c} - 1}}{\sqrt{\frac{h_a}{h_c} - 1}} \quad |3.2|$$

El giro del extremo de una viga biapoyada de inercia variable sometida a momentos iguales en sus extremos es igual a

$$\theta = \frac{Ml}{f \cdot EI_c} \quad |3.3|$$

siendo f un coeficiente que depende de los factores de forma de la pieza de inercia variable.

Igualando ambos giros y despejando M se obtiene que

$$M = \frac{\alpha \cdot \Delta T \cdot EI_c}{h_c} \frac{f}{2} \frac{\arctg \sqrt{\frac{h_a}{h_c} - 1}}{\sqrt{\frac{h_a}{h_c} - 1}} \quad |3.4|$$

En el caso de piezas de inercia constante y canto constante se verifica que

$$f = 2$$

$$\lim_{h_a \rightarrow h_c} \frac{\arctg \left(\sqrt{\frac{h_a}{h_c} - 1} \right)}{\sqrt{\frac{h_a}{h_c} - 1}} = 1 \quad |3.5|$$

obteniéndose para el momento de empotramiento perfecto la conocida expresión

$$M = \frac{\alpha \cdot \Delta T \cdot EI_c}{h_c} \quad |3.6|$$

En el caso de piezas de canto variable se verifica siempre que

$$f \cdot \frac{\arctg \left(\sqrt{\frac{h_a}{h_c} - 1} \right)}{\sqrt{\frac{h_a}{h_c} - 1}} > 2 \quad |3.7|$$

Ello quiere decir que alas y almas con regruesamientos o cartelas en sus extremos se ven solicitadas a mayores momentos de flexión que en el caso en el que no se diseñaran aquéllas en las zonas de unión ala-alma. Por consiguiente, las tensiones térmicas transversales en secciones cajón acarteladas son de mayor magnitud que las que aparecerían si no se dispusieran tales acartelamientos.

Es evidente que siempre es recomendable el disponer cartelas en estas uniones para facilitar el procedimiento constructivo y el recorrido de las trayectorias de tensiones originadas por las cargas de tráfico. No obstante, de cara a la sollicitación térmica transversal, es conveniente diseñar cartelas con una transición muy gradual y no plantear uniones de elementos de fuerte espesor con elementos de pequeño espesor sin el diseño apropiado de cartelas.

El marco que se ha analizado corresponde a un caso de variación parabólica del intradós de alas y almas y, aunque dicha variación no suele ser utilizada en el diseño debido a su dificultad constructiva, todos los resultados y conclusiones obtenidas son perfectamente extrapolables a toda tipología de cartelas y, en particular, a las cartelas triangulares las cuales son las más utilizadas en el diseño de las secciones transversales en cajón.

Por último, hay que hacer constar que el reparto transversal siempre dependerá de las rigideces relativas de alas y almas, las cuales influyen de forma directa en los valores de los momentos transversales que solicitan los elementos barra que conforman el marco.

Hasta este punto se ha llevado a cabo un exhaustivo estudio paramétrico de los puentes cajón unicelulares analizando la influencia de cada uno de los parámetros físicos, ambientales, de emplazamiento y de geometría que juegan en el fenómeno de la transmisión de calor. A continuación se pa

sa a obtener y analizar la respuesta térmica de los puentes cajón multicelulares haciendo hincapié en las particularidades y características diferenciadoras de tal respuesta con respecto a la de los puentes unicelulares.

3.3.2.- Puentes de sección en cajón multicelulares

El objetivo de este apartado es realizar un análisis comparativo de la respuesta térmica y tensional a nivel sección de los puentes cajón unicelulares y multicelulares frente a los efectos térmicos ambientales. Previamente se cree oportuno el señalar que en este apartado no se entra en la discusión sobre la elección de la tipología transversal en base a aspectos resistentes o de ejecución (elección de dos o más almas, alojamiento de anclajes, etc.).

Entrando en la temática en cuestión es de esperar, en buena lógica, que la respuesta térmica y tensional a nivel sección en puentes cajón multicelulares sea muy similar a la obtenida en puentes cajón unicelulares siendo las discrepancias observadas entre los resultados obtenidos para una y otra tipología mínimas y, en todo caso, cuantitativas y nunca cualitativas.

El estudio comparativo se basa en el análisis de dos secciones cajón de dos y tres almas con un mismo ancho de tablero de 14.0 metros, ancho para el cual parecen adaptarse de forma idónea ambas tipologías transversales (Mathivat (64)).

Las secciones cajón analizadas, con canto y ancho de tablero iguales, se muestran en la figura 3.108. El criterio de elección del espesor de las almas se ha basado en la suposición de que las dos vigas cajón sean equivalentes desde el punto de vista de su resistencia a cortante (deducidos los diámetros de las vainas de un pretensado genérico alojadas en cada una de las almas).

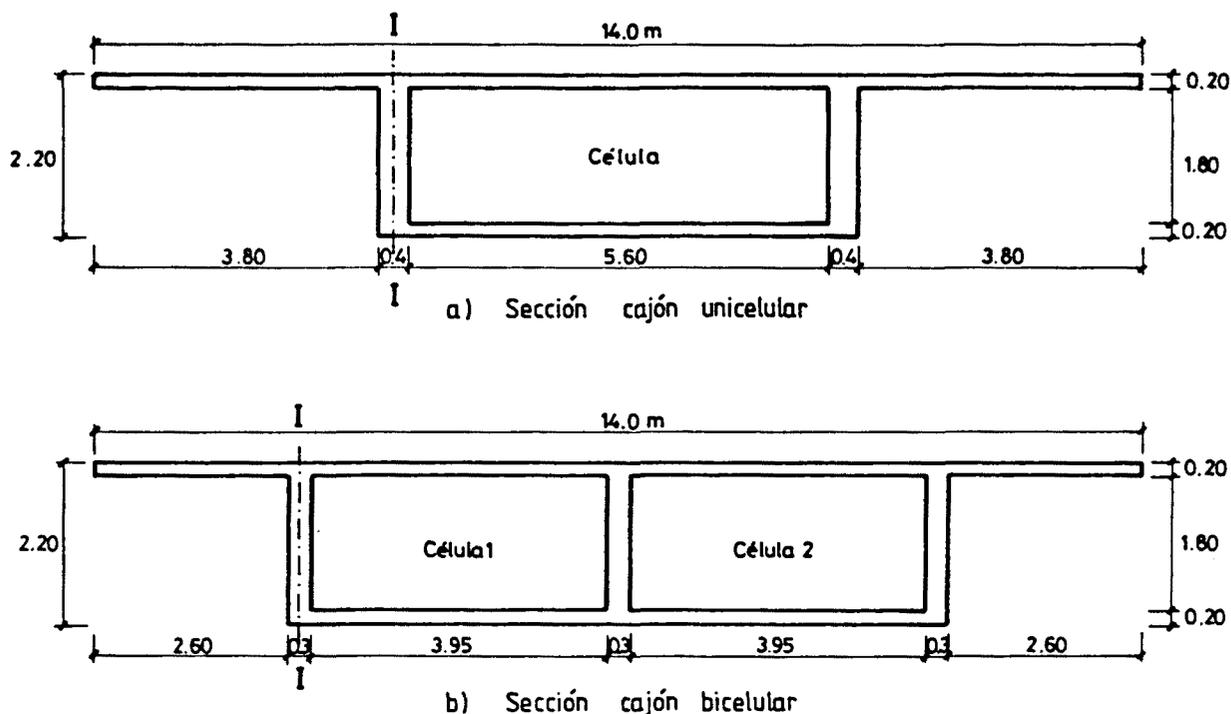


Fig. 3.108.- Secciones cajón unicelular y bicelular analizadas.

Las condiciones ambientales y de emplazamiento para llevar a cabo el análisis comparativo de la respuesta térmica de ambas tipologías transversales son las correspondientes al estudio básico de referencia de la sección cajón (puentes emplazados en Calgary, 51.03°N , con azimuts nulos y rangos de variación de la temperatura ambiente de 20°C analizados ambos el día 21 de Marzo) (el resto de condicionantes físicos y estructurales pueden contemplarse en la tabla 3.7).

A continuación, las figuras 3.109.a y 3.109.b muestran respectivamente la evolución diaria del gradiente térmico vertical y de la temperatura media de la sección para las diferentes secciones cajón unicelular y bicelular analizadas.

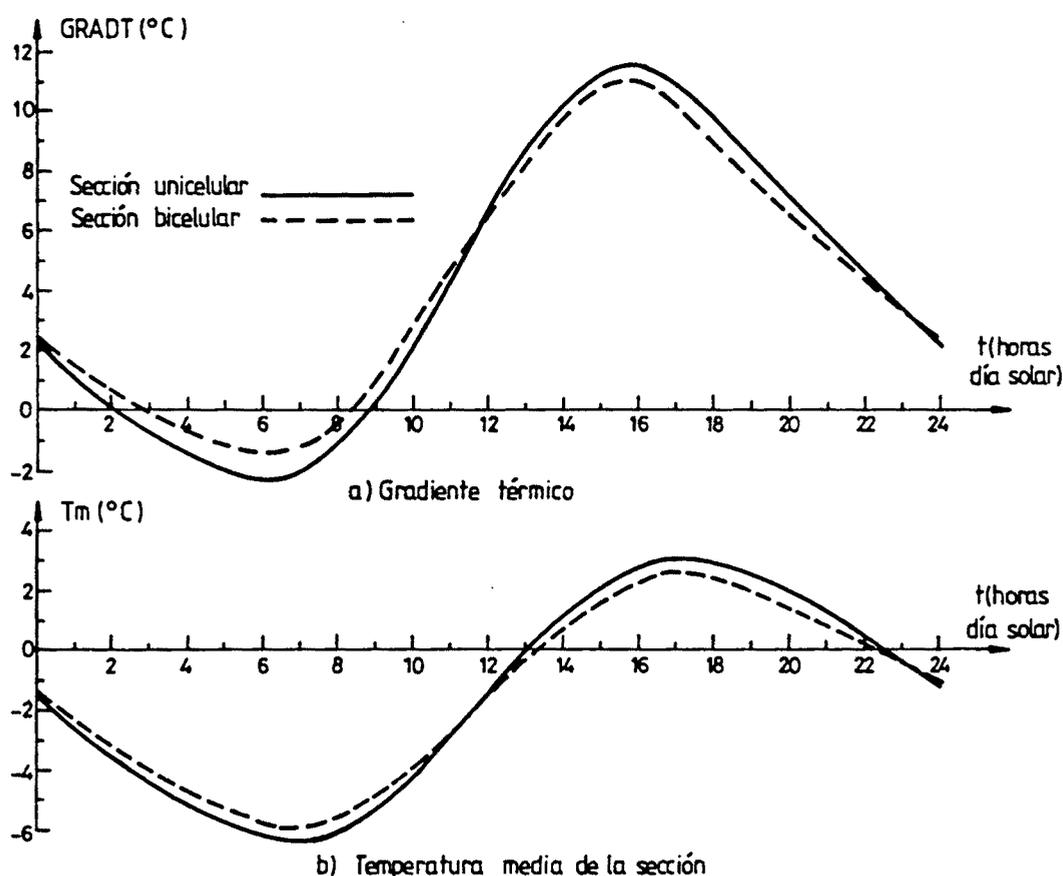


Fig. 3.109.- Evolución diaria del gradiente térmico y de la temperatura media de la sección para las secciones unicelular y bicelular analizadas.

Ambas funciones, gradiente y temperatura media, evolucionan de forma periódica a lo largo del día apreciándose el desfase temporal siempre existente entre los instantes para los cuales se generan los mínimos y máximos de dichas funciones. Tal desfase es el mismo para las dos secciones cajón analizadas y se encuentra próximo a las 2 horas.

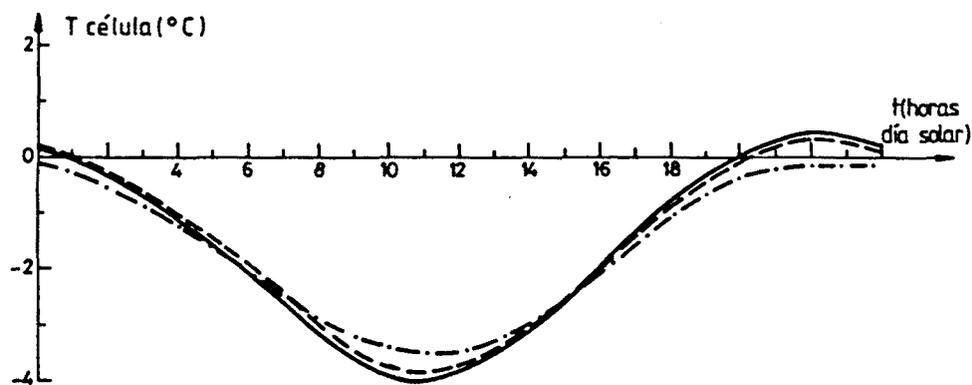
Por otra parte puede observarse que las oscilaciones o rangos de variación diaria del gradiente térmico y de la temperatura media de la sección son ligeramente mayores en la sección unicelular. Sin embargo, ello no es debido al hecho de que la sección posea una única célula sino a que la relación ancho de tablero - ancho de losa inferior es, en general,

mayor en la sección cajón unicelular que en la bicelular. Ello acentúa el efecto de la radiación solar sobre el tablero y provoca, a su vez, que los gradientes térmicos verticales máximos sean también de mayor magnitud. Recordemos que en el estudio de la influencia de la geometría de la sección sobre la respuesta térmica y tensional de los puentes cajón unicelulares uno de los parámetros analizados fue la relación de longitudes longitud del voladizo - canto del alma. Los resultados relativos a este parámetro, sinónimo de la relación de longitudes ancho de tablero - ancho de losa inferior, mostraban que cuanto mayor era la longitud del voladizo, adoptándose para el alma un canto constante, mayores eran los rangos de variación diaria del gradiente térmico vertical y de la temperatura media de la sección y mayores eran también los gradientes térmicos verticales máximos.

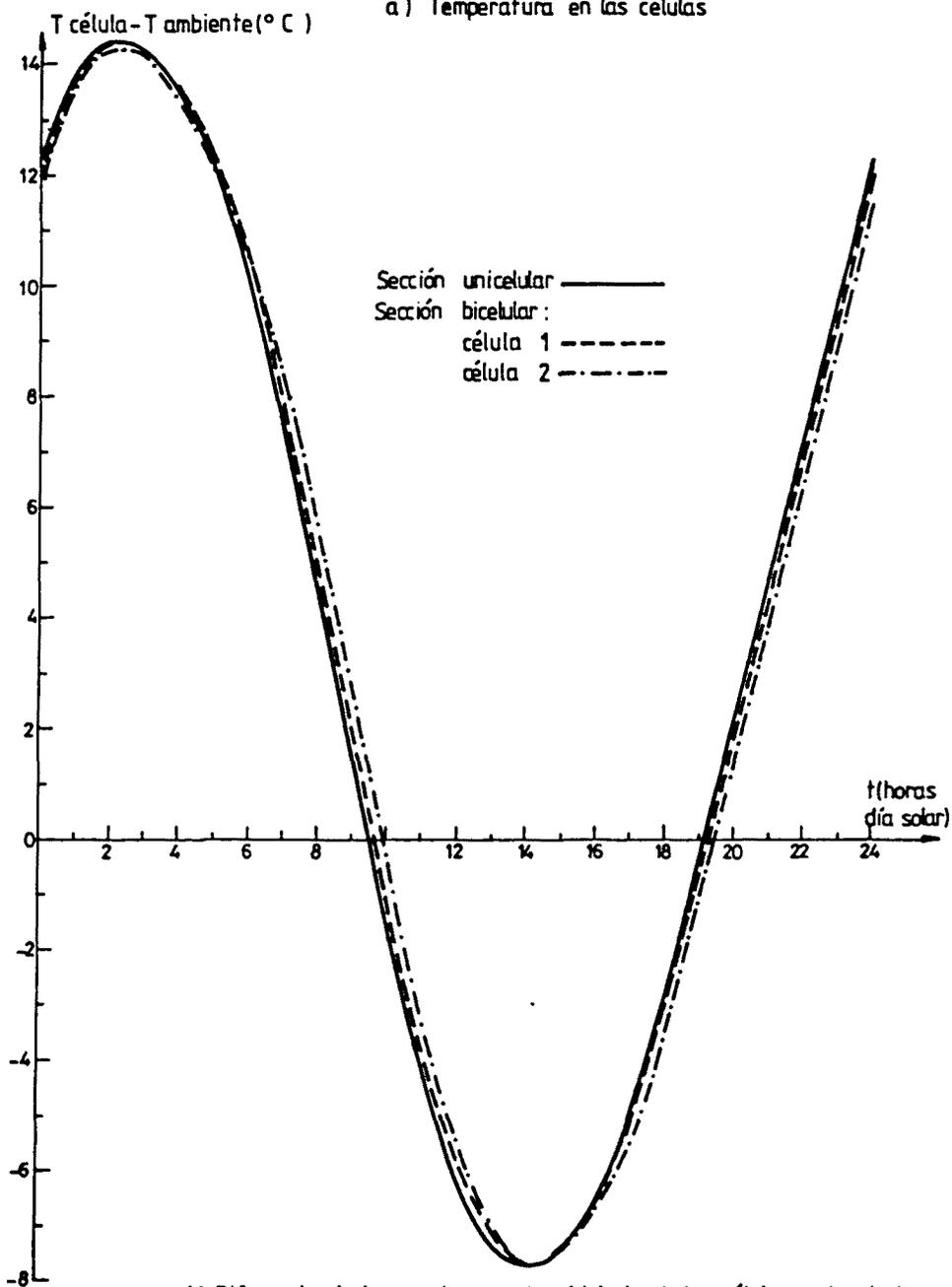
Las evoluciones diarias de la temperatura del aire de las células de las secciones unicelular y bicelular y de la diferencia de temperaturas entre el interior de las células y el ambiente exterior pueden contemplarse en las figuras 3.110.a y 3.110.b

En la primera de ellas puede apreciarse el siempre existente desfase temporal de la temperatura en el interior de las células con respecto a la temperatura media de la sección, desfase que se sitúa cercano a las 4 horas.

Por otra parte, la evolución de la temperatura en las células es prácticamente idéntica observándose ligeras diferencias en los valores de la temperatura de las dos células de la sección bicelular; dichas diferencias vienen originadas por la incidencia de radiación solar en el alma lateral izquierda -entre la célula 1 y el ambiente exterior-.



a) Temperatura en las células



b) Diferencia de temperaturas entre el interior de las células y el exterior

Fig. 3.110.- Evolución diaria de la temperatura del aire de las células y de la diferencia de temperaturas entre ésta y el ambiente exterior para las secciones unicelular y bicelular analizadas.

En cuanto a la evolución diaria de las diferencias de temperatura entre el interior de las células y el ambiente exterior se aprecia que aquélla es independiente de la tipología transversal analizada, induciéndose saltos térmicos entre ambos medios de cierta consideración (en torno a los 14°C en fase de descenso de la temperatura ambiente exterior).

A continuación, en la tabla 3.12 se presentan los valores máximos alcanzados por las diferentes sollicitaciones térmicas en las secciones cajón unicelular y bicelular analizadas.

| SOLICITACIONES TERMICAS (°C) | SECCION CAJON UNICELULAR | SECCION CAJON BICELULAR |
|---|--|--|
| Máximo gradiente vertical | 11.5 (a las 15.50 horas) | 10.9 (a las 15.50 horas) |
| Máximo gradiente transversal | 0.0 | 0.1 (a las 2.5 horas) |
| Incremento relativo diario de temperatura media de la sección | Tm máx-Tm mín=2.9 (a las 17.0 horas) -(-6.4) (a las 7.0 horas)=9.3 | Tm máx-Tm mín=2.4 (a las 17.0 horas) -(-5.8) (a las 7.0 horas)=8.2 |
| Máxima diferencia de temperaturas entre el aire de la célula y el ambiente exterior | 14.4 (a las 2.0 horas) : : | 14.4 (célula 1) 14.2 (célula 2) (a las 2.0 horas) |

Tabla 3.12.- Sollicitaciones térmicas máximas en las secciones cajón unicelular y bicelular analizadas.

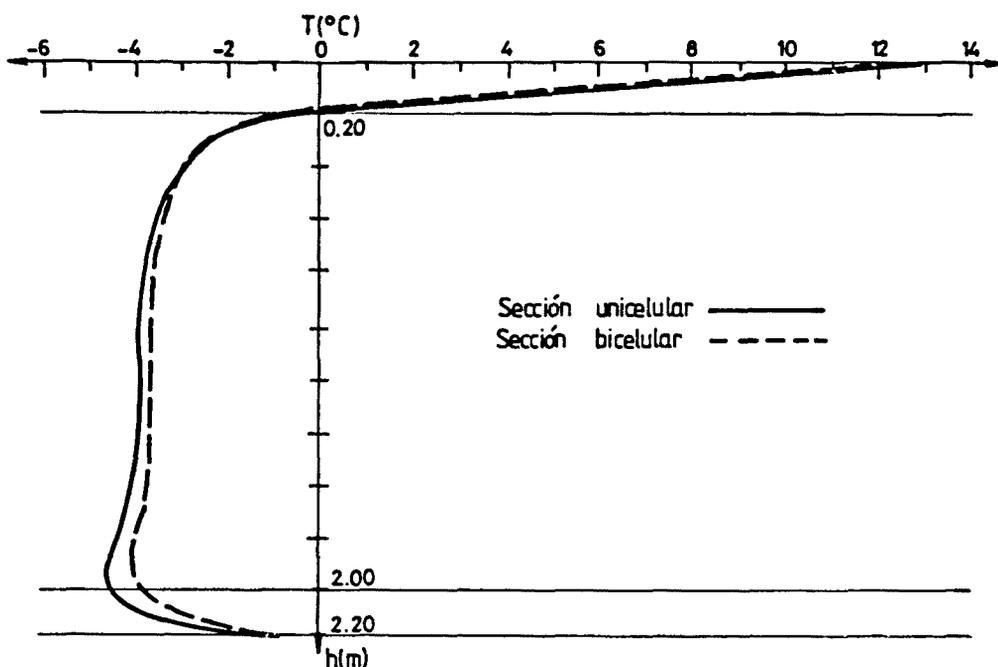
Un análisis de los resultados mostrados en esta tabla permite concluir que las diferencias son mínimas y si éstas existen, se debe únicamente al valor que adopta la relación de longitudes ancho de tablero - ancho de losa inferior y no al hecho de estar en presencia de una sección cajón unicelular o bicelular.

En lo referente a la distribución de temperaturas y de tensiones longitudinales autoequilibradas, puede apreciarse en la figura 3.111 que las diferencias son también mínimas. En dicha figura se presentan las distribuciones térmicas y tensionales según el eje vertical de simetría del alma lateral izquierda de ambas secciones, unicelular y bicelular (figura 3.108, eje I-I), correspondientes al instante en el que se genera el máximo gradiente térmico vertical.

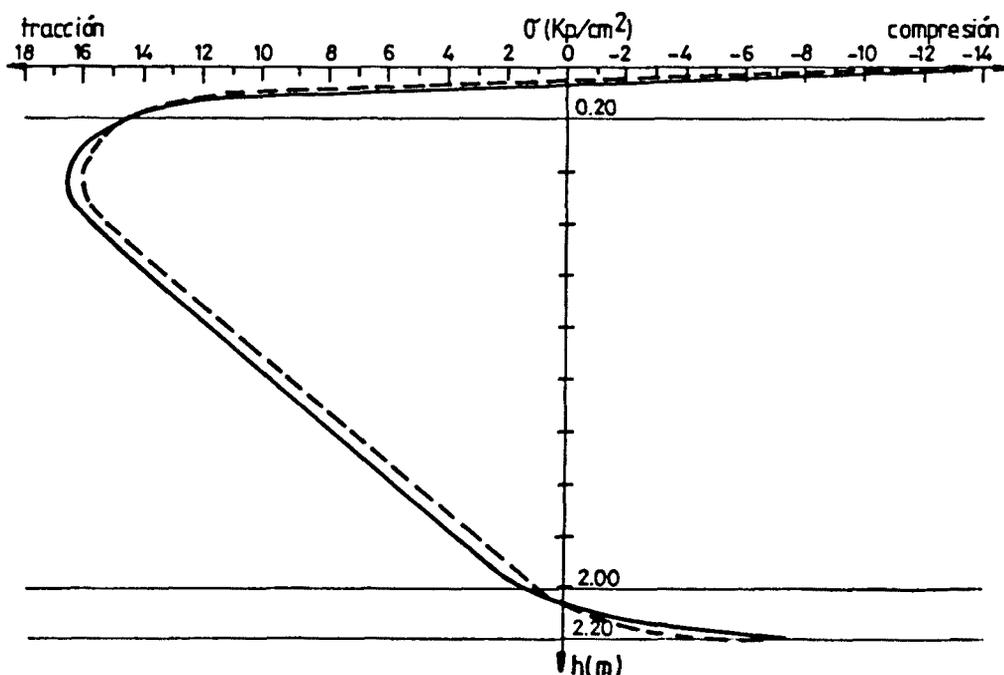
Del análisis de los resultados obtenidos en el estudio de las dos secciones cajón unicelular y bicelular pueden extraerse las siguientes conclusiones:

- La respuesta térmica y tensional de los puentes cajón multicelulares no difiere de forma apreciable de la de los puentes cajón unicelulares.
- El sentido en el que actúan todos los parámetros y variables que influyen en el fenómeno de la transmisión de calor en puentes de hormigón es el mismo para puentes cajón unicelulares y multicelulares.
- Si se observan diferencias entre la respuesta y comportamiento térmicos de ambas tipologías transversales, éstas son de carácter cuantitativo y nunca cualitativo y se encuentran íntimamente ligadas a la relación de longitudes ancho del tablero-ancho de losa inferior y longitud del voladizo-canto del alma.

En general, tales relaciones de longitudes son menores en puentes cajón multicelulares que en unicelulares y es por ello por lo que los primeros se verán sometidos a menores gradientes térmicos verticales, tanto positivos como negativos, si éstos últimos aparecen. Sin embargo, por esta misma razón y debido también a que en puentes multicelulares la relación longitud de voladizo - canto del alma es menor, puede afirmarse que éstos son más susceptibles de verse solicitados con gradientes térmicos transversales que los puentes unicelulares.



a) Distribuciones de temperaturas



b) Distribuciones de tensiones

Fig. 3.111.- Distribuciones de temperaturas y de tensiones longitudinales autoequilibradas según el eje vertical de simetría del alma lateral izquierda de las secciones unicelular y bicelular analizadas, correspondientes a los instantes de máximos gradientes térmicos verticales.

Por último, y aunque en los estudios paramétricos anteriores referentes a la sección losa maciza y sección cajón no se ha analizado la influencia del coeficiente de dilatación térmica y del módulo de elasticidad del hormigón, es obvio que dichas propiedades no influyen en absoluto en la distribución del campo de temperaturas y, dada la formulación expuesta en el capítulo anterior para la obtención de las tensiones longitudinales autoequilibradas, es igualmente obvio que para un mismo hormigón la magnitud de éstas últimas es directamente proporcional a los valores adoptados por el coeficiente de dilatación térmica y por el módulo de elasticidad del hormigón.

3.4.- ANALISIS COMPARATIVO DE LOS RESULTADOS DE LOS ESTUDIOS PARAMETRICOS DE LA SECCION LOSA MACIZA Y LA SECCION CAJON

A la vista de los resultados obtenidos en ambos estudios paramétricos (apartados 3.2 y 3.3) puede concluirse que la mayoría de los parámetros físicos, estructurales, ambientales y de emplazamiento actúan en el mismo sentido.

Las diferencias existentes entre la respuesta térmica y tensional de ambas tipologías transversales, diferencias achacables a los diversos condicionantes de emplazamiento y ambientales de los casos estudiados, son únicamente cuantitativas a excepción de lo obtenido al analizar la influencia de la velocidad del viento.

En efecto, la respuesta térmica y tensional de puentes cajón al ir variando el valor adoptado por este factor climático muestra sensibles diferencias cualitativas con respecto a la respuesta de puentes losa maciza. Tales diferencias estriban, por un lado, en el hecho de que, en el caso de sección cajón, cuanto mayor es la velocidad del viento mayor es la expansión eficaz diaria del puente y, por otro, en que a medida que aumenta dicha velocidad se observa un ligero aumento en la magnitud de las tensiones autoequilibradas. Dicho comportamiento, opuesto al observado en secciones losa maciza, es debido a que el coeficiente de transferencia de calor por convección en las superficies internas en contacto con el aire de la célula se mantiene constante, es mínimo e independiente del valor adoptado por la velocidad del viento.

Por otra parte, la propia tipología transversal de la sección cajón -existencia de huecos interiores de gran volumen- introduce dos particularidades claramente diferenciadoras del comportamiento y respuesta de los puentes losa en lo que se refiere a las sollicitaciones o acciones térmicas a considerar.

La primera es la aparición de gradientes térmicos transversales que, en algunos casos, pueden ser de cierta consideración. Los máximos alcanzados por dichos gradientes son mayores en meses de mínima intensidad de radiación solar y en puentes emplazados en paralelos geográficos cercanos al polo y con azimuts de -45° , -eje del puente NE-SO- y $+45^{\circ}$, -eje del puente NO-SE-. Asimismo, en puentes de inercia variable serán las secciones próximas a la zona de apoyos las que se verán sometidas a gradientes térmicos transversales más elevados.

La segunda es que se aprecian diferencias notables entre la temperatura existente en el interior de la célula y la temperatura ambiente exterior. Tales diferencias térmicas pueden generar tensiones transversales, contenidas en el plano de la sección, a causa de la propia hiperestaticidad interna del cajón pudiendo alcanzarse valores elevados con respecto a la resistencia a tracción del hormigón, o incluso mayores en el caso de que se produzca un brusco y repentino descenso de la temperatura ambiente exterior. Recordemos que ello fue la razón desencadenante de la puesta fuera de servicio del puente cajón de Jagst en Untergriesheim, Alemania (Leonhardt, Kolbe y Peter (56)). Por otra parte, no se observan influencias muy significativas de ninguno de los parámetros analizados sobre la magnitud que alcanzan dichas diferencias de temperatura.

Así pues, a mi entender, es conveniente evaluar los efectos de la sollicitación térmica transversal acentuándose dicha conveniencia en el caso de que la flexión transversal del tablero originada por las cargas de tráfico genere tensiones de cierta importancia. Ello puede suceder, por ejemplo, si estamos en presencia de una sección en cajón con voladizos de una longitud considerable en los que la actuación descentrada de las cargas rodantes puede inducir momentos de flexión en las almas demasiado elevados. En el caso de puentes de inercia variable dicho efecto se acusa más en las sec

ciones cercanas a la sección de clave del vano en donde la mayor rigidez relativa de las almas hace que éstas absorban, en un principio, mayor momento de flexión.

Por consiguiente, de lo dicho hasta este punto, puede desprenderse que un diseño ajustado del espesor de las almas de puentes cajón unicelulares necesitará de la evaluación de los efectos tensionales inducidos por la sollicitación térmica transversal.

Por último, se cree de interés el hacer hincapié en dos conclusiones las cuales son perfectamente válidas para ambas tipologías transversales.

La primera de ellas hace referencia al posible flujo longitudinal de calor en puentes de inercia variable. Se ha observado que dicho flujo no es significativo con lo cual la respuesta térmica se puede obtener a nivel seccional suponiendo flujo bidireccional a lo largo y ancho de la sección transversal.

La segunda se refiere al hecho de que los resultados derivados del estudio paramétrico relativo a la influencia del día del año indican que la variación anual de la temperatura media de la sección, es decir del puente, atiende en gran medida a las condiciones ambientales y climatológicas existentes en el lugar de emplazamiento y, en menor medida, a la propia tipología transversal de la sección o, lo que es lo mismo, al espesor ficticio de la sección. Este último parámetro influye de forma notoria únicamente en la oscilación diaria de la temperatura media de la sección.

3.5.- OTRAS TIPOLOGIAS TRANSVERSALES EN PUENTES DE HORMIGON

Hasta este apartado se han llevado a cabo numerosos estudios paramétricos relativos a cada una de las variables físicas, estructurales, ambientales, geométricas y de emplazamiento que entran en juego en el fenómeno de la transmisión de calor en puentes de hormigón y que influyen sobre la respuesta térmica y tensional a nivel sección. Dichos estudios han sido aplicados a las tipologías transversales de puentes losa maciza y puentes cajón unicelulares y multicelulares.

En base a lo expuesto al comenzar este capítulo, resta obtener y analizar la respuesta a nivel seccional de otras tipologías transversales de frecuente utilización en el diseño y construcción de puentes de hormigón y éstas son las correspondientes a los puentes losa aligerada y los puentes de vigas. Para tales tipologías no se realizarán estudios paramétricos tan amplios como los llevados a cabo en anteriores apartados de este capítulo ya que su modelización numérica de cara a la obtención de la distribución de temperaturas y tensiones y su respuesta térmica pueden aproximarse con suficiente precisión a la obtenida en puentes cajón o en puentes losa maciza.

3.5.1.- Puentes losa aligerada

La respuesta térmica y tensional de los puentes losa aligerada no difiere, desde un punto de vista cualitativo, de la obtenida en puentes cajón multicelulares. En efecto, la sección transversal de ambas tipologías viene definida por la existencia de huecos -aligeramientos o células- y almas interiores de un determinado espesor lo que hace que el programa numérico a emplear de cara a la obtención de las distribuciones de temperaturas y de tensiones longitudinales autoequilibradas sea exactamente el mismo para ambos casos sin tener que introducir ninguna nueva variable o cambio específico de la propia tipología transversal de los puentes losa aligerada.

Obviamente, cuanto menor sea el volumen de los aligeramientos con respecto al volumen encerrado por el contorno exterior de la sección más próximo será el comportamiento térmico de los puentes losa aligerada al de los puentes losa maciza y más se alejará del de los puentes cajón multicelulares.

A continuación, se analiza la respuesta térmica y tensional a nivel sección de un puente losa aligerada. Los resultados derivados de este análisis se comparan con los obtenidos para un puente losa maciza de igual canto. Dicho análisis comparativo viene justificado por el hecho de que estas tipologías transversales cubren luces de vanos sensiblemente similares no siendo así, en general, en el caso de las tipologías correspondientes a los puentes losa aligerada y a los puentes cajón multicelulares.

Las secciones transversales de los puentes losa maciza y losa aligerada analizados se muestran en la figura 3.112.

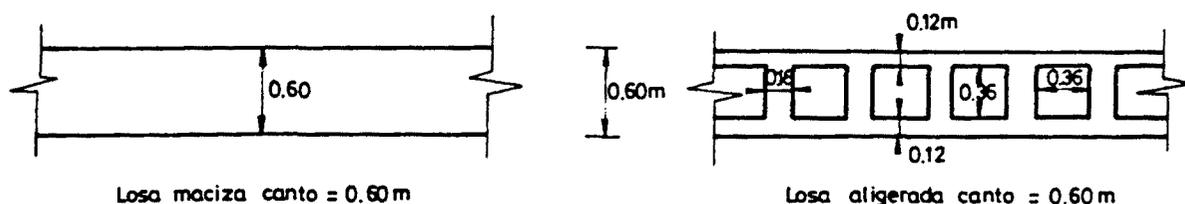


Fig. 3.112.- Secciones losa maciza y losa aligerada analizadas.

Las condiciones ambientales, climatológicas y de emplazamiento son iguales para ambos puentes y son las adoptadas al llevar a cabo el análisis paramétrico de la sección losa maciza (ver tabla 3.1) (condiciones correspondientes al día 21 de Marzo en el término municipal de Rubí, provincia de Barcelona).

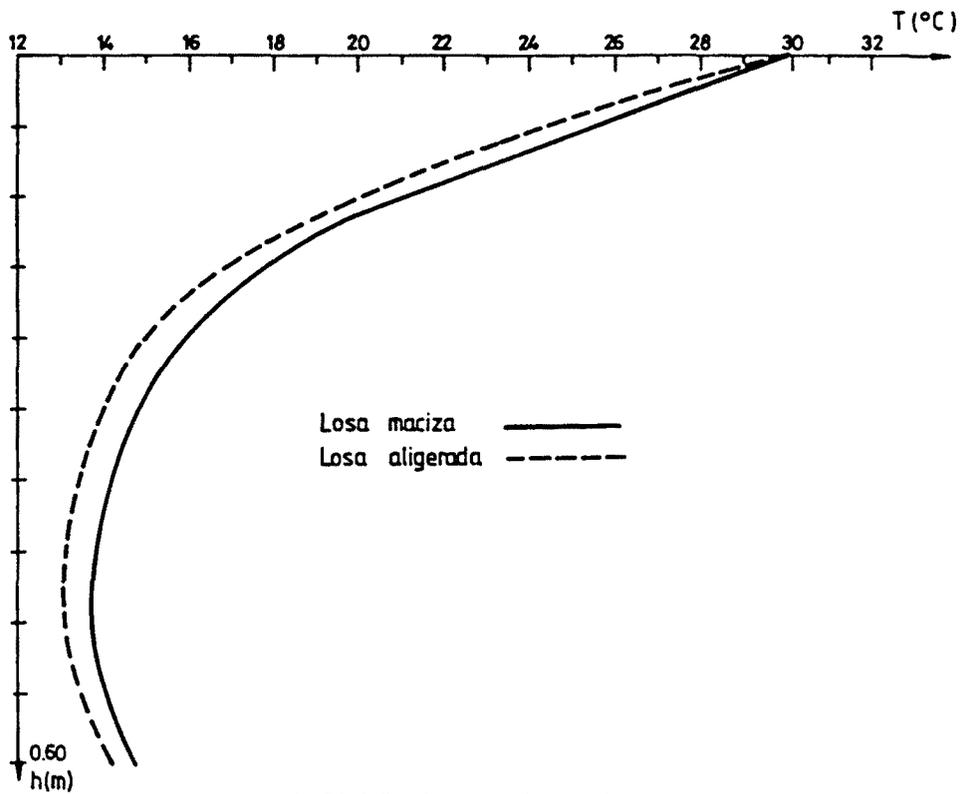
En las figuras 3.113.a y 3.113.b se presentan las distribuciones de temperaturas y tensiones longitudinales autoequilibradas correspondientes a los instantes para los cuales se alcanzan las máximas curvaturas térmicas en ambas secciones según el eje de simetría.

A la vista de las gráficas mostradas en ambas figuras puede apreciarse que la distribución de temperaturas en el caso de la sección losa aligerada presenta una no linealidad algo más acusada traduciéndose ello en una mayor magnitud de las tensiones longitudinales autoequilibradas de tracción. Dicho comportamiento viene originado por la inercia térmica que presenta el volumen de aire de los aligeramientos la cual impide que el aire de éstos se caliente con mayor rapidez.

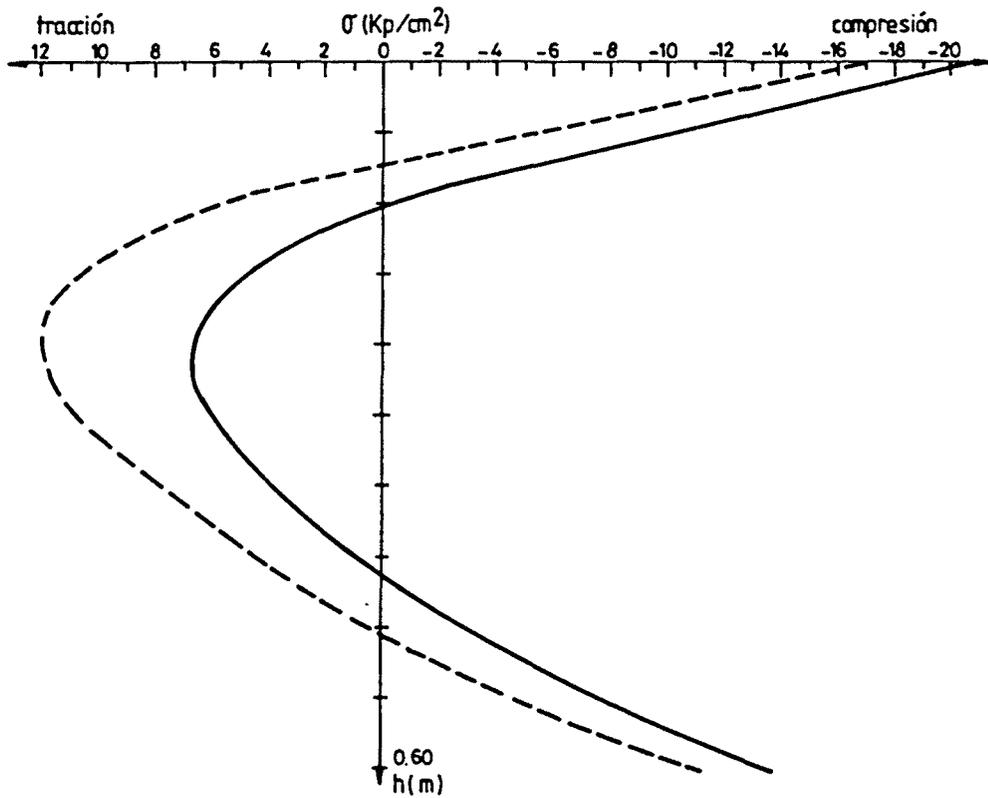
Las figuras 3.114.a y 3.114.b muestran respectivamente las evoluciones diarias del gradiente térmico vertical y de la temperatura media de la sección correspondientes a la losa maciza y losa aligerada así como los gradientes y temperaturas medias máximas alcanzados por ambas secciones.

En dichas figuras se aprecia que los perfiles de las evoluciones diarias de ambas funciones térmicas son similares si bien puede observarse que los rangos de variación diaria del gradiente térmico y de la temperatura media de la sección son mayores en el caso de losa aligerada. Asimismo los gradientes térmicos verticales máximos y las temperaturas medias máximas de la sección son también de mayor magnitud.

En lo referente a la magnitud de las tensiones longitudinales autoequilibradas se observa de nuevo que existen dos instantes del día para los cuales se alcanzan las máximas tracciones en el hormigón. Ello ocurre así independientemente de si se está en presencia de una losa maciza o una losa aligerada.



a) Distribuciones de temperaturas



b) Distribuciones de tensiones

Fig. 3.113.- Distribuciones de temperaturas y de tensiones en las losas macizas y aligeradas de canto 0.60 metros correspondientes a instantes de máximo gradiente térmico vertical según el eje de simetría de la sección.

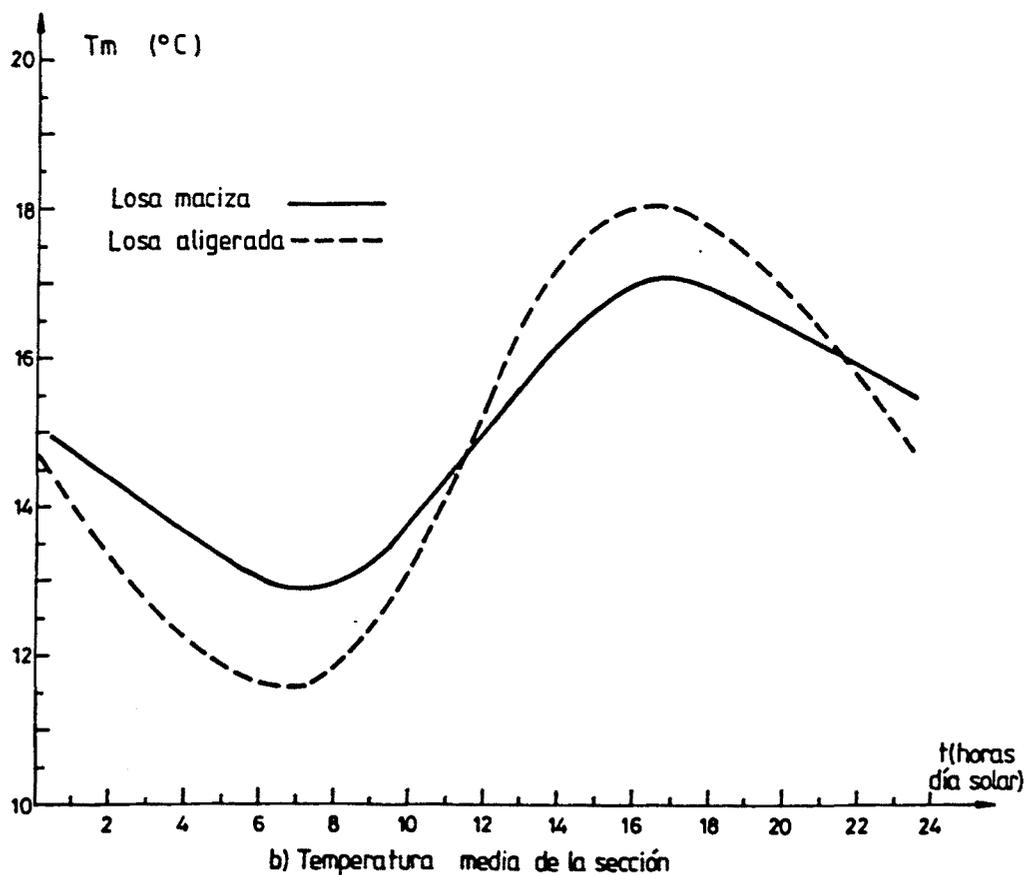
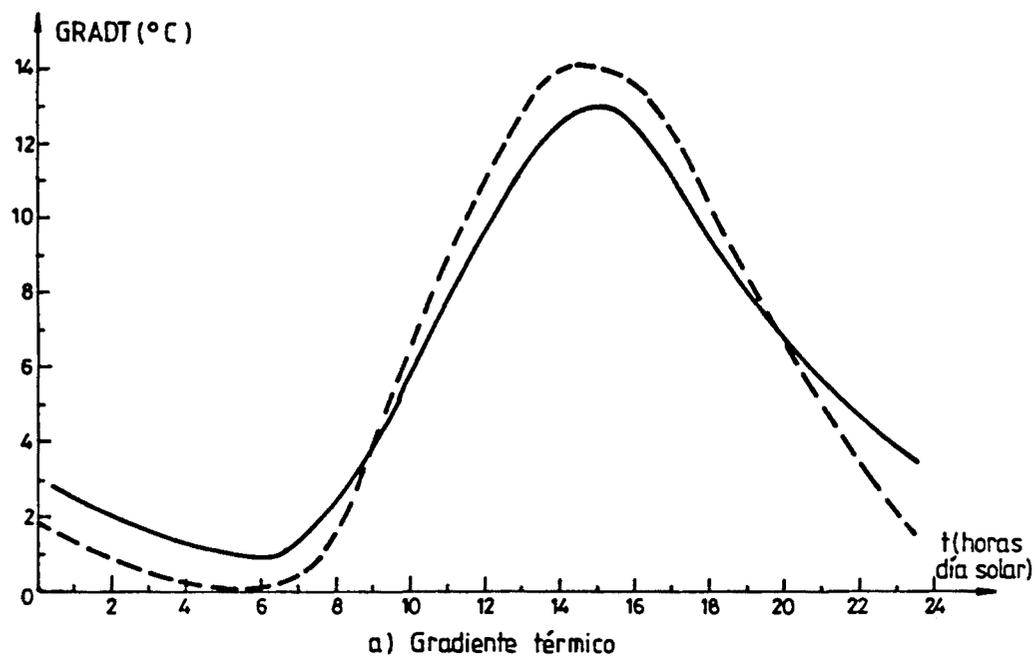


Fig. 3.114.- Evolución diaria del gradiente térmico vertical y de la temperatura media de la sección para las losas maciza y aligerada analizadas.

Tales instantes tienen lugar a primeras horas de la madrugada induciéndose las tracciones máximas en el contorno exterior de la sección y a horas próximas al instante de máximo gradiente térmico vertical induciéndose las tracciones máximas en las fibras intermedias de la sección (ver figura 3.113.b).

A continuación, en la figura 3.115 quedan reflejadas las distribuciones de tensiones correspondientes al instante de primeras horas de la madrugada en las dos tipologías transversales analizadas. Tales distribuciones se presentan en el eje de simetría de ambas secciones.

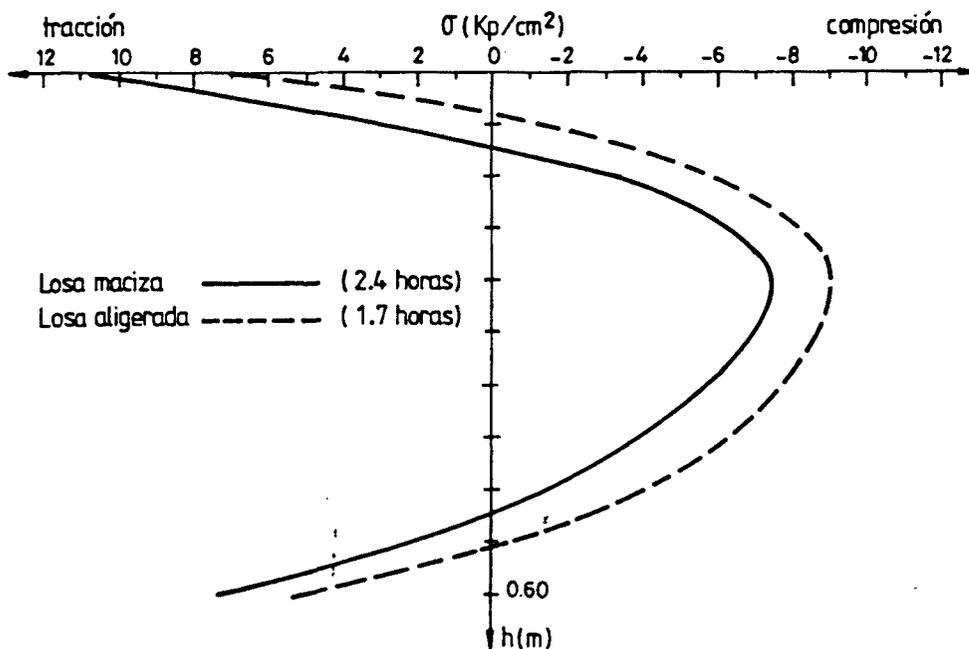


Fig. 3.115.- Distribuciones de tensiones longitudinales autoequilibradas en sección losa maciza y losa aligerada según su eje de simetría a primeras horas de madrugada.

En este caso se observa un desplazamiento de la distribución de tensiones en la losa aligerada hacia la zona de compresión.

Es evidente que el análisis comparativo atiende a unas condiciones de contorno y de geometría determinadas. Para llegar a obtener conclusiones que posean un carácter más general se ha estimado oportuno el analizar, para unas condiciones ambientales y de emplazamiento fijas, diversos puentes losa maciza y losa aligerada en los que varía el canto total de la sección. Así pues, se ha obtenido la respuesta térmica de diversas losas macizas y aligeradas de cantos 0.45 m., 0.60 m., 0.75 m., 0.90 m. y 1.05 m. En el caso de la sección losa aligerada se han adoptado las siguientes relaciones geométricas:

- Aligeramientos cuadrados de sección $0.6 h \times 0.6 h$ siendo h el canto total de la sección.
- Espesores de alas superior e inferior iguales a $0.2 h$.
- Separación interejos de vigas igual a $0.9 h$.

Dichas relaciones pueden atender, de forma aproximada, a unas condiciones tipo de aligeramiento en puentes losa de hormigón.

Los resultados relativos a gradientes térmicos verticales y a incrementos relativos diarios de la temperatura media correspondientes a cada una de las secciones estudiadas se recogen en la figura 3.116.

Las gráficas presentadas en dicha figura muestran y corroboran lo ya expuesto en el apartado 3.2 de este capítulo al estudiar la influencia del canto de la sección sobre la respuesta térmica de los puentes losa maciza. En efecto, se aprecia de nuevo que cuanto mayor es el canto de la pieza menores son los gradientes térmicos verticales máximos y menores son también los incrementos relativos diarios de la temperatura media -expansiones eficaces diarias-, hecho que se presenta tanto en puentes losa maciza como aligerada.

Por otra parte, se aprecia que los gradientes máximos e incrementos de temperatura alcanzan valores algo más eleva-

dos en puentes losa aligerada que en puentes losa maciza. Sin embargo, puede observarse que a medida que aumenta el canto de la sección las diferencias existentes van desvaneciéndose ya que el efecto de la célula o aligeramiento pierde importancia. Ello es debido a que en secciones losa aligerada, y en función de las condiciones de aligeramiento supuestas en el análisis, cuanto mayor es el canto de la sección mayor es el recorrido de las líneas de flujo de calor a través del hormigón existente entre el ambiente exterior y los aligeramientos interiores.

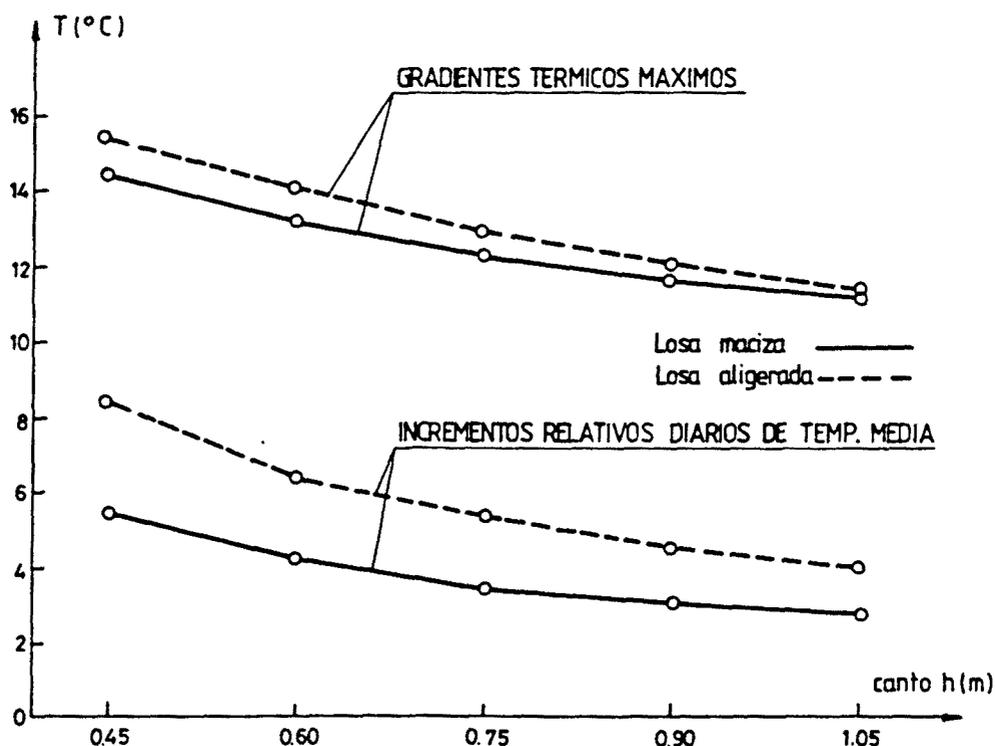


Fig. 3.116.- Influencia del canto de la sección sobre los gradientes térmicos máximos e incrementos relativos de temperatura media alcanzados por las diferentes secciones losa analizadas.

Como resumen, cabe resaltar a continuación algunas conclusiones relativas a la respuesta térmica de los puentes losa aligerada:

- La obtención de la respuesta térmica de los puentes losa aligerada se afronta, desde un punto de vista numérico, de igual forma que en puentes cajón multicelulares.
- Todos los parámetros físicos, ambientales y de emplazamiento que influyen en la respuesta térmica y tensional de los puentes losa aligerada actúan en el mismo sentido en el que lo hacen en puentes cajón. Lógicamente, las sollicitaciones transversales por diferencia de temperaturas entre el ambiente exterior y los aligeramientos y los gradientes térmicos transversales pierden la relevancia que adquirían en el estudio y análisis térmico de los puentes cajón.
- Cuanto menor es el canto de la sección losa aligerada mayores son los gradientes máximos y los incrementos relativos diarios de temperatura media de la sección y menores son las tensiones longitudinales autoequilibradas.
- En puentes losa aligerada, los rangos de variación diaria del gradiente térmico y de la temperatura media de la sección así como los gradientes y temperaturas medias máximas son mayores que en puentes losa maciza de igual canto. No obstante, tales diferencias van disminuyendo a medida que aumenta el canto de la sección (con cantos próximos a 1.0 metros se aprecian diferencias significativas únicamente en el incremento relativo diario de temperatura media).

3.5.2.- Puentes de vigas

Debido a la propia tipología transversal de los puentes de vigas, el análisis térmico y tensional de éstos puede centrarse en la obtención de la respuesta térmica de una única viga ya que, por simetría, el flujo de calor existente en la zona de losa comprendida entre dos vigas contiguas es prácticamente vertical.

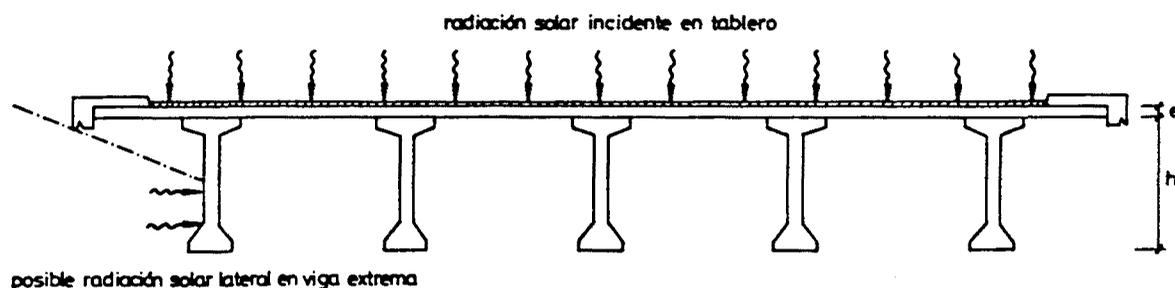


Fig. 3.117.- Puente de vigas. Radiación solar incidente en tablero.

En el presente subapartado se analizarán diversas sec ciones transversales de vigas a utilizar en el proyecto y construcción de puentes de hormigón. Estas se supondrán some tidas a unas condiciones de contorno simétricas respecto al eje de simetría de la sección. La fuente de calor originada por el efecto de la radiación solar se sitúa exclusivamente en la fibra superior de la losa del tablero y el problema se analiza adoptando la hipótesis de flujo bidimensional a través de la sección transversal. De esta forma siempre es posi ble visualizar los intercambios de calor existentes entre la viga y el ambiente exterior a través del perímetro externo de la sección.

Las secciones a analizar se muestran en la figura 3.118 y atienden, de forma general, a unas condiciones de di seño propuestas por diversas empresas especializadas dedicadas al proyecto y ejecución de vigas prefabricadas de hor-

migón pretensado para puentes. Los condicionantes ambientales, climatológicos, estructurales y de emplazamiento adoptados en el presente estudio son los expuestos en la tabla 3.1, correspondientes a puentes emplazados en el término municipal de Rubí, provincia de Barcelona, con azimut nulo y realizándose el análisis para el día 21 de Marzo. Sobre dichas vigas se dispondrá una losa de hormigón de espesor igual a 0.20 metros.

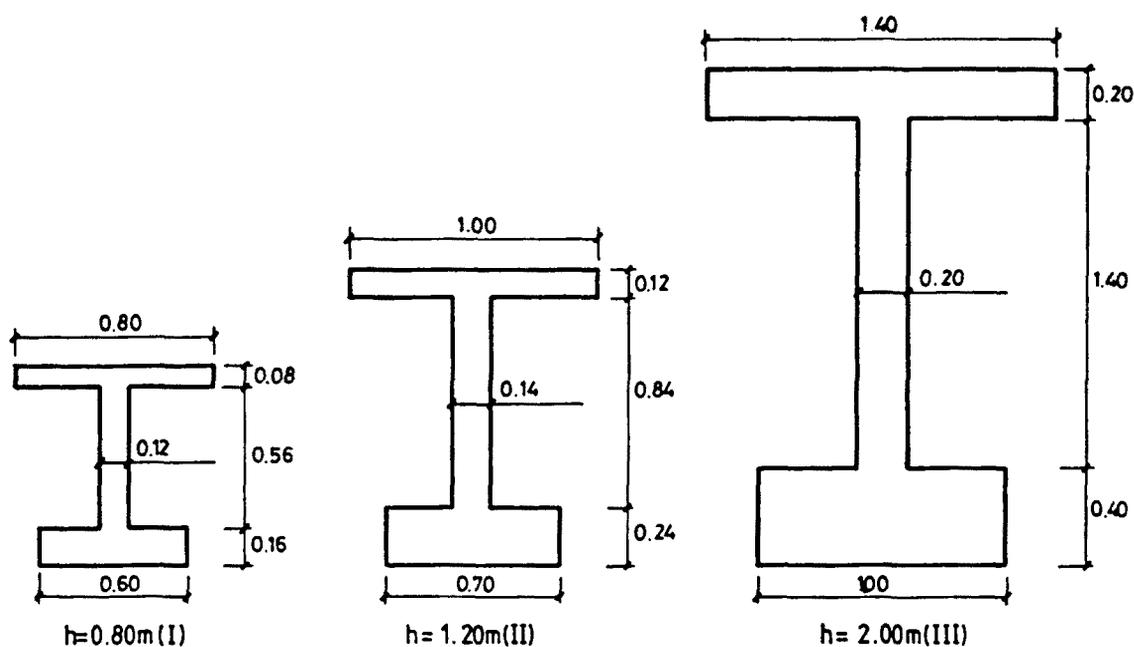
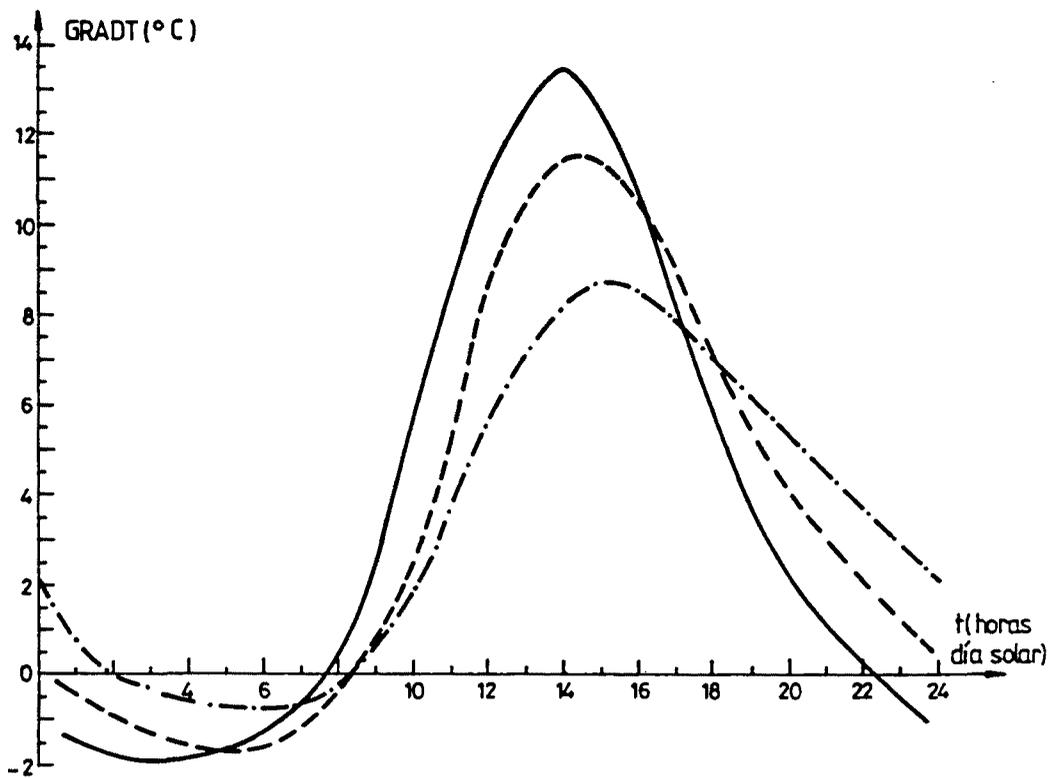


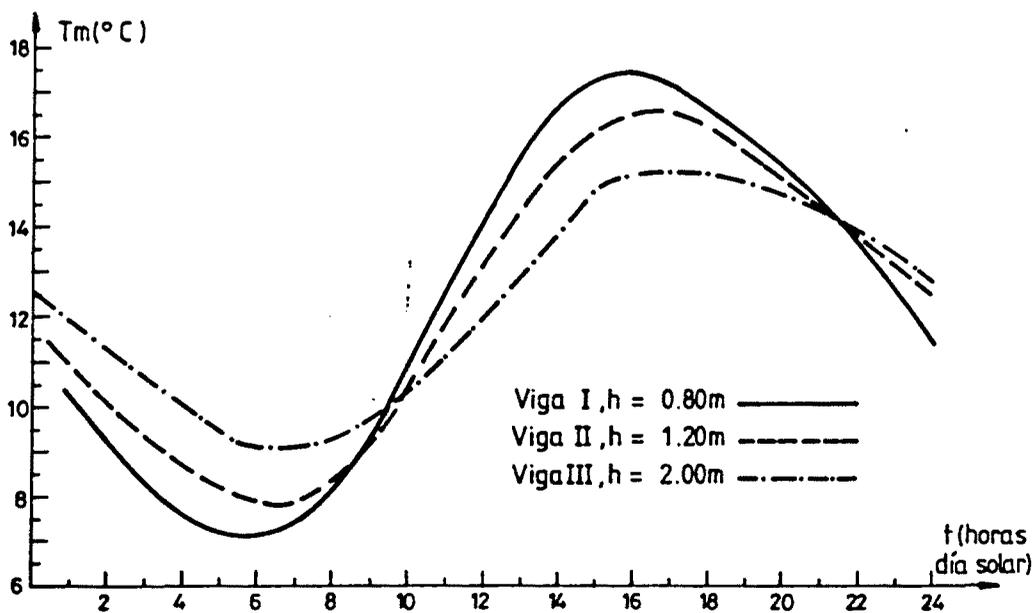
Fig. 3.118.- Secciones de vigas en doble T analizadas.

Las figuras 3.119.a y 3.119.b muestran respectivamente las evoluciones diarias del gradiente térmico vertical y de la temperatura media de la sección.

En ambas figuras pueden apreciarse las evoluciones periódicas del gradiente y de la temperatura media de la sección observándose que los máximos y mínimos de esta última función se presentan con un cierto retraso temporal con respecto a los de la función gradiente térmico.



a) Gradiente térmico



b) Temperatura media de la sección

Fig. 3.119.- Evolución diaria del gradiente térmico vertical y de la temperatura media de la sección para las tres vigas en doble T analizadas.

Por otra parte, puede observarse también que los rangos de variación diaria del gradiente térmico y de la temperatura media de la sección son mayores cuanto menor es el canto de la viga analizada.

Por último, es interesante constatar que, al igual que ocurría en las tipologías transversales de puentes de hormigón anteriormente analizadas, los gradientes térmicos verticales máximos son más elevados cuanto menor es el canto de la viga. Ello queda reflejado de forma clara en la figura 3.120.

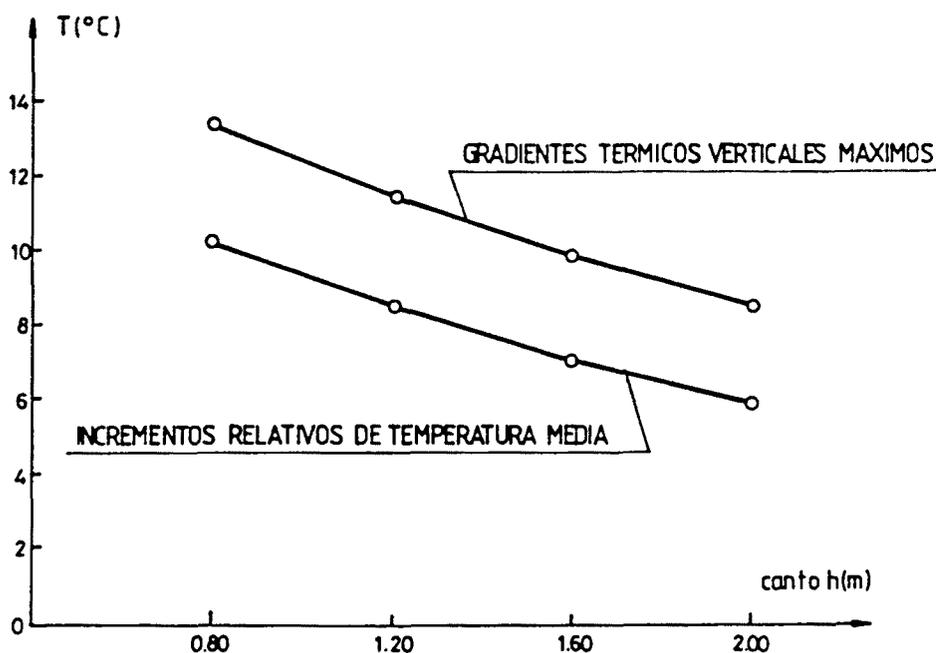


Fig. 3.120.- Influencia del canto de la viga sobre los gradientes térmicos máximos e incrementos relativos de temperatura media de la sección alcanzados por las diferentes secciones en doble T analizadas.

En lo referente a los resultados relativos a las distribuciones de tensiones longitudinales autoequilibradas se aprecia que éstas tienen perfiles similares entre sí independientemente de la viga analizada. La figura 3.121 muestra las distribuciones tensionales correspondientes al instante en el que se genera la máxima tracción en el hormigón. Dicho ins-

tante se encuentra, en general, próximo al instante en el que se induce el máximo gradiente térmico y, por consiguiente, dada la distribución de las temperaturas a lo largo de la sección, las fibras del alma de la viga en doble T serán las que se ve rán sometidas a tales tracciones máximas.

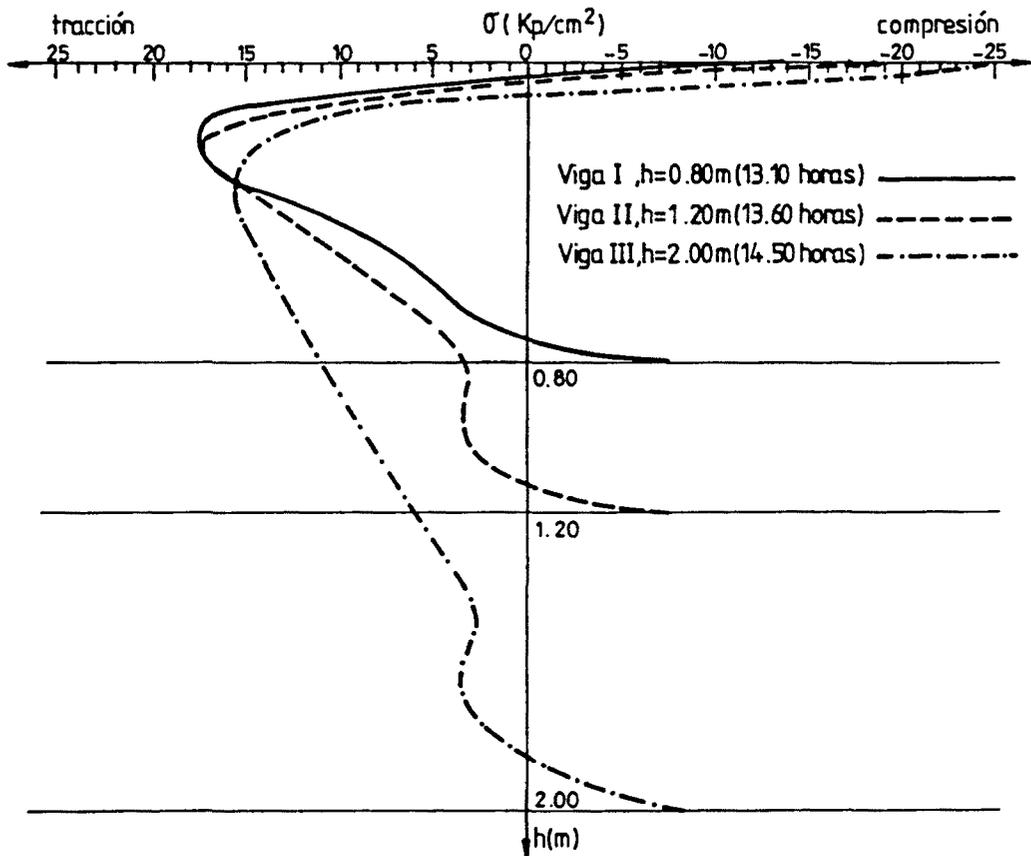


Fig. 3.121.- Distribuciones de tensiones longitudinales autoequilibradas según el eje de simetría correspondientes al instante en el que se induce la máxima tracción en el hormigón para cada una de las vigas en doble T analizadas.

Puede observarse que cuanto mayor es el canto de la viga más acusada es la no linealidad de la distribución de temperaturas apreciándose que la fibra superior de la sección se ve sometida a una mayor compresión a medida que aumenta el canto. Las magnitudes de las tracciones máximas alcanzadas en cada una de las secciones estudiadas difieren poco entre sí -diferencias máximas del orden del 11%-. Tales

tracciones aparecen en las fibras situadas, aproximadamente, a 0.2 h (20% del canto total de la viga) de distancia del borde superior de las vigas y ello ocurre así independientemente de la viga analizada.

En resumen, de los resultados obtenidos del presente estudio se pueden extraer las siguientes conclusiones, relativas al comportamiento y obtención de la respuesta térmica de los puentes de vigas:

- La obtención de la respuesta térmica de los puentes de vigas se puede afrontar, desde un punto de vista numérico, de igual forma que en puentes losa maciza. En general, es aceptable el adoptar la hipótesis de flujo unidireccional en la dirección vertical del eje de simetría de la viga.
- Todos los parámetros físicos, ambientales y de emplazamiento que pueden influir en la respuesta térmica y tensional de los puentes de vigas actúan en el mismo sentido en el que lo hacen en puentes losa maciza. Por otra parte, los efectos de radiación solar incidente lateral pueden ser despreciados en el análisis térmico de los puentes de vigas puesto que su influencia sobre el gradiente transversal y sobre las variaciones tensionales es mínima.
- Cuanto menor es el canto de la sección analizada mayores son los gradientes térmicos verticales máximos y los incrementos relativos de temperatura media y menos acusada es la no linealidad de la distribución del campo de temperaturas.

En algún caso puede ser de interés, y necesario, el analizar, desde un punto de vista térmico, la sección transversal en su totalidad. Ello ocurre así al obtener la respuesta térmica y tensional de puentes en π con dos nervios situados cada uno a ambos extremos del tablero (ver figura 3.122).

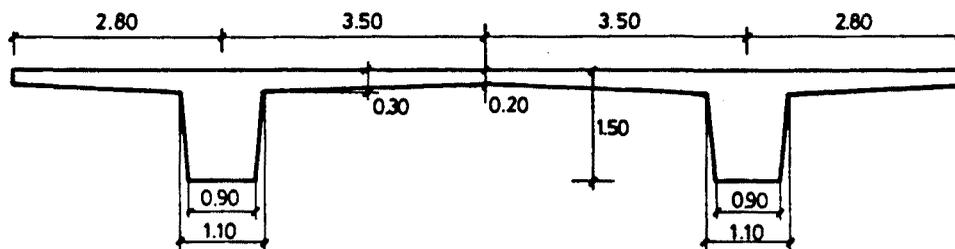


Fig. 3.122.- Sección transversal de un puente de hormigón en π .

Efectivamente, las contracciones y dilataciones térmicas que experimenta la losa del tablero en dirección transversal pueden inducir momentos torsores de cierta entidad en los nervios extremos (Priestley y Buckle (85)).

Por último, se cree de interés el hacer una llamada de atención sobre la posibilidad de que, en puentes de vigas prefabricadas con losa superior hormigonada in situ, los hormigones de vigas y losa presenten propiedades térmicas -difusividad térmica y coeficiente de dilatación térmica- diferentes. Ello hará que la sección conjunta se comporte como una sección compuesta frente a la acción térmica, induciéndose el consecuente esfuerzo rasante en las superficies de contacto de las vigas y la losa superior. Tal esfuerzo se puede ver acrecentado por el hecho de que ambos hormigones presenten valores diferentes del módulo de elasticidad y muestren a lo largo del tiempo un comportamiento diferido sensiblemente diferente.

