

UNIVERSIDAD DE SANTANDER

**ESCUELA TECNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS**

TESIS DOCTORAL

**"SIMULACION DEL COMPORTAMIENTO TERMICO DE
TABLEROS DE PUENTE Y SU INFLUENCIA
EN EL ESTADO TENSIONAL"**

Presentada por: **PEDRO SERRANO BRAVO**

Dirigida por: **JOAQUIN CRUCES DE ABIA**

Santander, Junio 1985

CAPITULO IV

CONDICIONES TERMICAS DE CONTORNO

4.1. INTRODUCCION

La ecuación de transmisión de calor de un cuerpo viene dada, según se explicó en el Capítulo 2.2, por la ecuación:

$$\Delta t = \frac{\rho C}{k} \frac{\partial t}{\partial \tau} \quad (4.1)$$

Esta ecuación diferencial de segundo grado precisa para su resolución, según se indicó en dicho capítulo de unas condiciones iniciales y de unas condiciones de contorno que pueden variar a lo largo del tiempo.

En el caso de los tableros de puente las condiciones de contorno es el propio ambiente, según se observa en la figura 4.1.

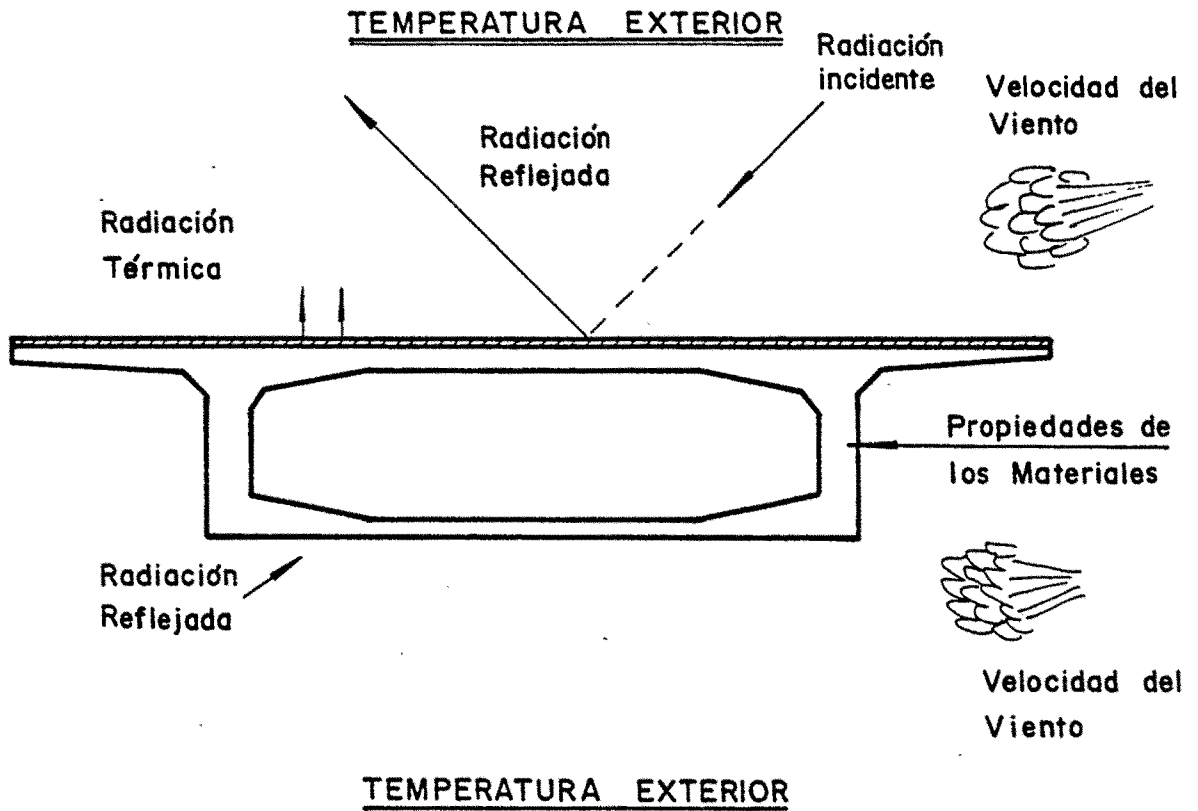


Figura 4.1.

En este capítulo se tratará de determinar cuales son estas condiciones y sus valores medios o máximos que puedan afectar a los puentes en España.

De los tres mecanismos de transmisión de calor existentes (Capítulo I), el mecanismo de conducción se produce en el interior del cuerpo y no puede considerarse como un mecanismo de transmisión en el contorno. Los dos sistemas restantes, radiación y convección sí que son mecanismos de transmisión de calor típicamente de contorno.

La aplicación de la condición de contorno de radiación sobre tableros de puente se refiere al caso de la radiación solar incidente sobre el tablero, o a la emisión de radiación del tablero hacia el cielo en el caso de noches frías y despejadas. En este capítulo se tratará de determinar el valor de la radiación solar incidente y su distribución temporal para su aplicación en cada caso particular.

En el caso de condición de contorno de convección, entran en juego la temperatura del borde del puente y la temperatura ambiente que exista en cada instante. Por tanto se trata de estudiar los valores de las temperaturas ambientes, sus valores medios y extremos, sus oscilaciones y su distribución geográfica.

Todo este capítulo, tanto en lo referente a los valores de radiación como de temperaturas se aplicará siempre al caso de España.

4.2. RADIACION SOLAR EN ESPAÑA

4.2.1. LA RED RADIOMETRICA

Aunque el estudio de la radiación solar ha ocupado la atención de muchos científicos desde hace siglos en España, no se ha podido empezar a acometer el establecimiento de una red radiométrica nacional, hasta la celebración del Año Geofísico Internacional en 1957/58. Desde entonces, se ha progresado notablemente en el desarrollo de la Red, así como en el del instrumental y en la creación de una exhaustiva normativa de aceptación internacional.

La red radiométrica nacional consta de un centro radiométrico nacional y de un conjunto de estaciones radiométricas, distribuidas e instaladas de manera que las observaciones sean lo más representativas posibles.

Desde 1957 hasta 1973 se han obtenido (6) , aunque no con la deseable continuidad, datos de irradiación solar global en unas 16 estaciones radiométricas. A partir de 1975, y como consecuencia de los trabajos iniciales en 1972, el Instituto Nacional de Meteorología consigue establecer una Red radiométrica propiamente dicha de características comparables a las del resto de los países europeos.

La red radiométrica nacional disponía en 1983 de 15 estaciones para medida horaria de irradiación global y difusa mediante pironómetros termoeléctricos, 20 estaciones para medida horaria de irradiación global también dotadas de pironómetro termoeléctrico y 20 estaciones con pironómetro bi metálico para medida de irradiación global diaria.

4.2.2. MAPAS DE IRRADIACION

La realización de mapas medios de irradiación solar requiere disponer de series de datos suficientemente prolongados como para estar estabilizados y que correspondan a estaciones de una red radiométrica de distribución adecuada.

Hasta hace pocos años la mayoría de los mapas de irradiación trazados, lo habían sido, partiendo de otras variables meteorológicas, como temperatura, nubosidad, duración de insolación, altitud, o bien a través de fórmulas que permiten hacer una estimación del valor de irradiación global diaria.

En la publicación de los datos de irradiación de los años 1975 y 1976 (8) el Instituto Nacional de Meteorología publica unos primeros mapas de irradiación con los datos de la irradiación solar global diaria obtenidos hasta entonces, en los que solamente incluía la distribución media anual, y la mensual de Enero y Julio.

En la publicación "Calendario Meteorológico 1983" (13) del Instituto Nacional de Meteorología, se editan los primeros mapas de irradiación solar global diaria media, a partir de valores registrados con un mapa cada mes, y otro con la media de todo el año.

En 1984, el Instituto Nacional de Meteorología publica el "Atlas de la Radiación Solar en España" (10) con una serie de mapas muy cuidados a escala 1:500.000 en que se consideran los datos de insolación directa, o días de sol, para cada mes, y además los mapas de insolación solar global diaria media actualizados con datos cada mes, con intervalo entre isolíneas cada $0,2 \text{ Kw h/m}^2$.

Además incluye entre otros un mapa de gran importancia para el presente estudio: El mapa de radiación solar global máxima diaria correspondiente al mes de Junio (media de los valores diarios máximos). Este se incluye en la figura 4.2 junto con los valores medios del mes de Junio (figura 4.3) como comparación entre ambos.

En la figura 4.2 se indica que los valores máximos de radiación solar global diaria registrados en España supera en todo el territorio el valor de 8 Kwh/m^2 , habiendo grandes extensiones en que alcanza el valor de $9,5 \text{ Kwh/m}^2$.

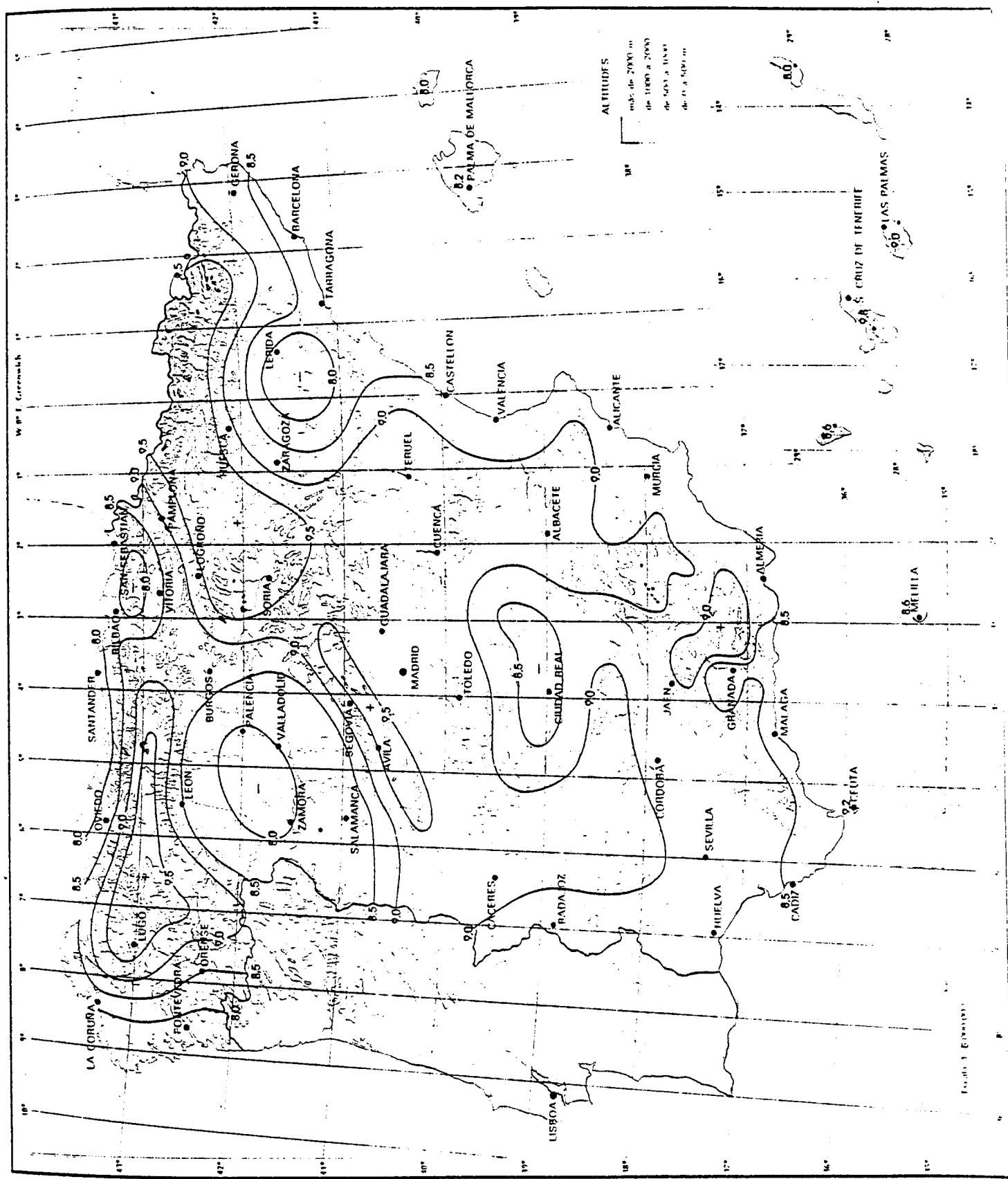


Figura 4.2

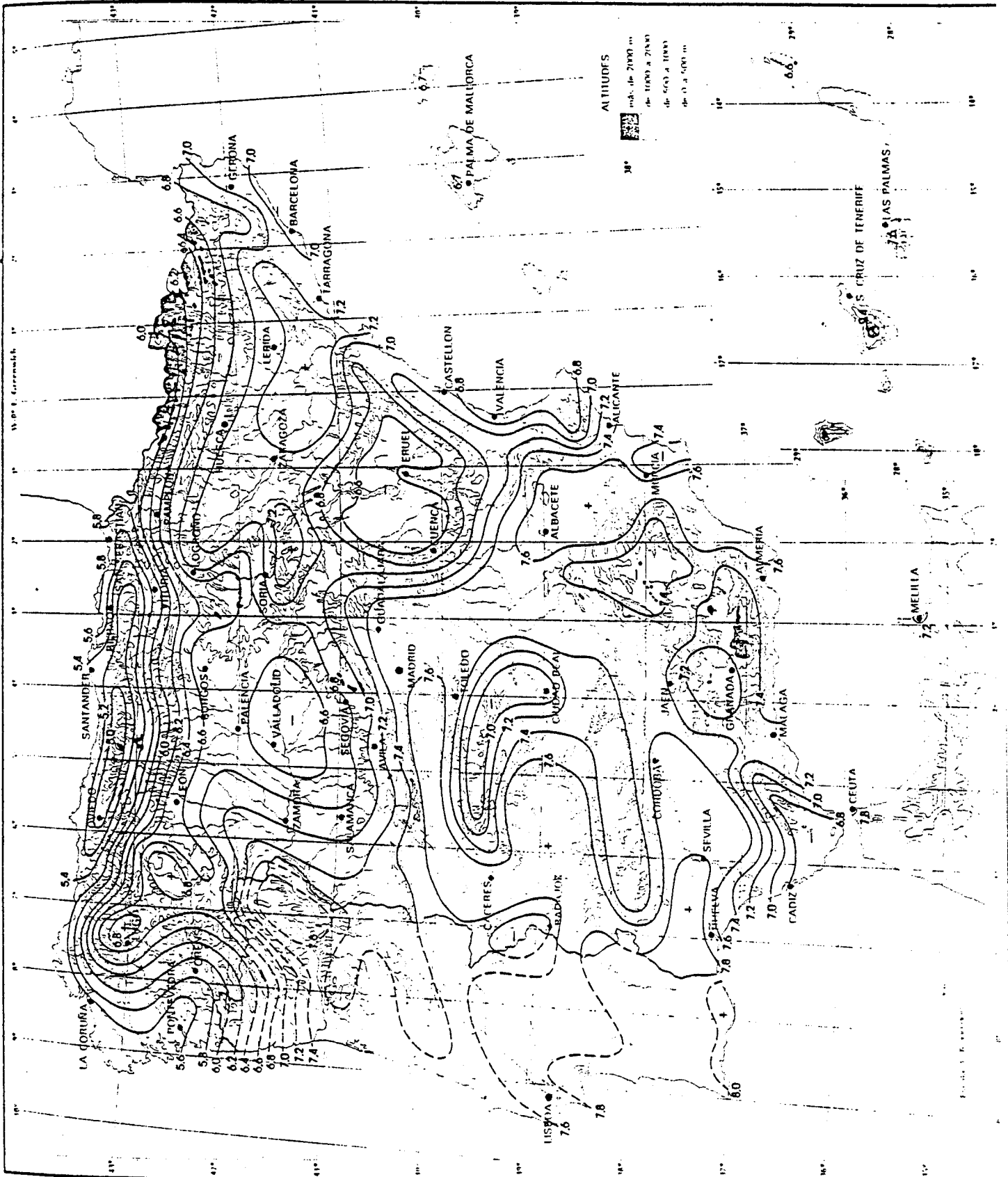


Figura 4.3

Este valor de $9,5 \text{ Kwh/m}^2$ de radiación global máxima se considerará en el presente trabajo como la máxima radiación global diaria sobre España para todos los casos en que se precise como dato inicial en el cálculo de temperaturas de puentes.

Otra particularidad importante referida a la radiación máxima registrada es que varía muy poco de unos lugares a otros, mientras que los valores medios de la radiación tienen una mayor variación, como se aprecia comparando las figuras 4.2 y 4.3.

4.2.3. IRRADIACION GLOBAL DIARIA

Este es el parámetro de la radiación solar más útil para la investigación, y representa irradiación solar global o energía solar, recibida sobre la unidad de superficie horizontal durante un día. Las unidades generalmente utilizadas son wátios hora/ m^2 .

Con los valores de irradiación global diaria, se puede estudiar sus valores medios mensuales y anuales, los valores máximos y mínimos y cualquier otro dato sin más que aplicar las técnicas estadísticas.

Existen datos numéricos en España desde el año 1957 en que solamente había 2 estaciones. Hasta el año 1975 no hay

datos continuos en ninguna estación. A partir de 1975 están publicados datos de 33 estaciones radiométricas, que cubren la geografía y que han permitido confeccionar los mapas de irradiación, ya que este dato de la irradiación global diaria es el representado en dichos mapas.

4.2.4. IRRADIACION GLOBAL HORARIA

En las publicaciones del Servicio Meteorológico Nacional (7), (8), (9), (10) incluyen los datos de irradiación global horaria desde el año 1974 en que sólo existían datos de Madrid, hasta el año 1980 en que existen datos de 11 estaciones radiométricas. Las unidades expresadas son Watios hora/m² ó Julios/m² cada hora, es decir watios/m² o julios/hora.m².

De esta forma se pueden dibujar (figura 4.4) las curvas de irradiación solar a lo largo del día para su posible aplicación, cuya suma deberá ser la Irradiación Global Diaria, y cuya forma o distribución se puede comparar con las diversas expresiones teóricas o empíricas de la distribución de la radiación solar existentes.

4.2.5. DISTRIBUCION INSTANTANEA DE LA RADIACION SOLAR

Este dato es el más importante desde el punto de vista térmico para estudiar el comportamiento térmico transitorio

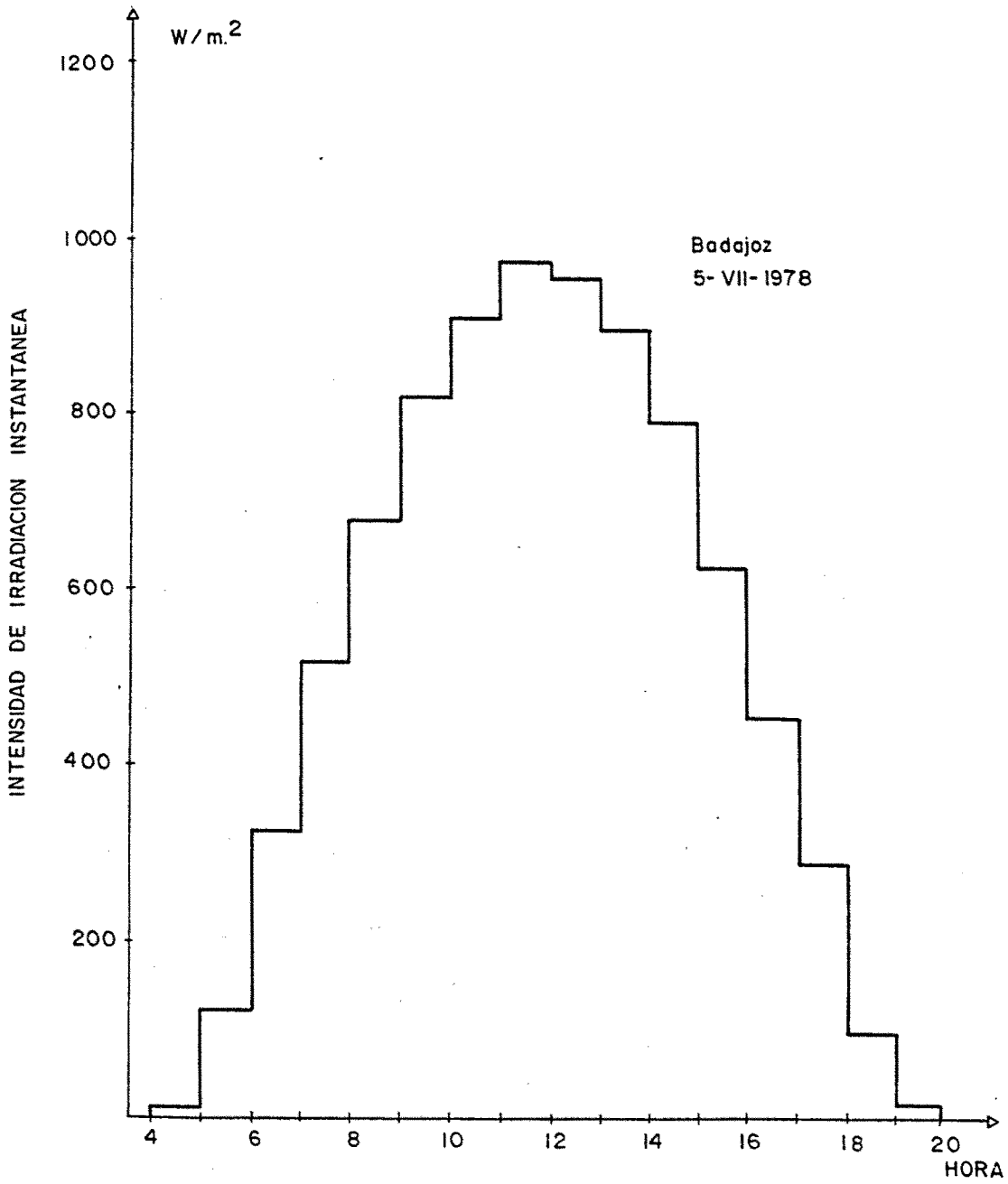


Figura 4.4

de un puente, ya que por la medida de los espesores de hormigón con que se trabaja, esta onda de radiación de período un día, penetra en la totalidad del puente y define primordialmente su estado térmico, como se demuestra en esta tesis.

Además del valor total de la energía de la onda térmica y su período, interesa su distribución en el tiempo, ya que este dato en cada instante de tiempo se debe imponer en el estudio del estado transitorio de un puente.

Para el conocimiento de la distribución instantánea de la radiación solar, se pueden tomar los datos publicados correspondientes a la irradiación global horaria y representalo en un diagrama "Irradiación horaria/tiempo" y estudiar esta gráfica.

El resultado para la estación de Badajoz el día 5 de Julio de 1978 se representa en la figura 4.4. Para un mejor tratamiento de estos valores sobre todo desde el punto de vista analítico y numérico se puede tratar de ajustar diversas curvas de expresión matemática sencilla que se aproximen a los escalones de los valores horarios.

Históricamente se tanteó una distribución de radiación de tipo senoidal a lo largo del día (14), sin embargo, este tipo de errores no se ajusta a los datos experimentales, por lo que se siguieron intentando otras curvas. Gloyne (5) propone una expresión de tipo:

$$I(t) = \frac{2S}{T} \operatorname{sen}^2 \frac{\pi t}{T} \quad (4.2)$$

$I(t)$ = Intensidad de la radiación solar en un plano horizontal en el instante t (W/m^2) $0 < t < T$.

S = Intensidad global de radiación en el día ($\text{W}\cdot\text{h}/\text{m}^2$).

T = Horas totales de sol en el día totalmente despejado.

Al tratar de obtener la correlación entre esta curva teórica y los registros reales, Mary Emerson (3) encontró que los datos de irradiación obtenidos en Inglaterra se ajustaban perfectamente a la expresión anterior, pero añadiendo una hora más al valor T del número de horas de sol.

Se ha tratado de ajustar una curva a los datos de radiación registrados en España y se han tanteado las dos curvas anteriores definidas por Gloyne y Emerson. El resultado se puede observar en la figura 4.5. con los datos horarios de uno de los días mas soleados registrados en España, que al igual que en el apartado anterior, se ha considerado el día 5 de julio de 1978 en la estación de Badajoz con un total de $8428 \text{ Wh}/\text{m}^2$. El ajuste es mejor, según se observa en la citada figura para el caso de la expresión de Emerson (3), sobre todo en la hora punta del medio-día en que los valores de (4.2) son excesivamente altos.

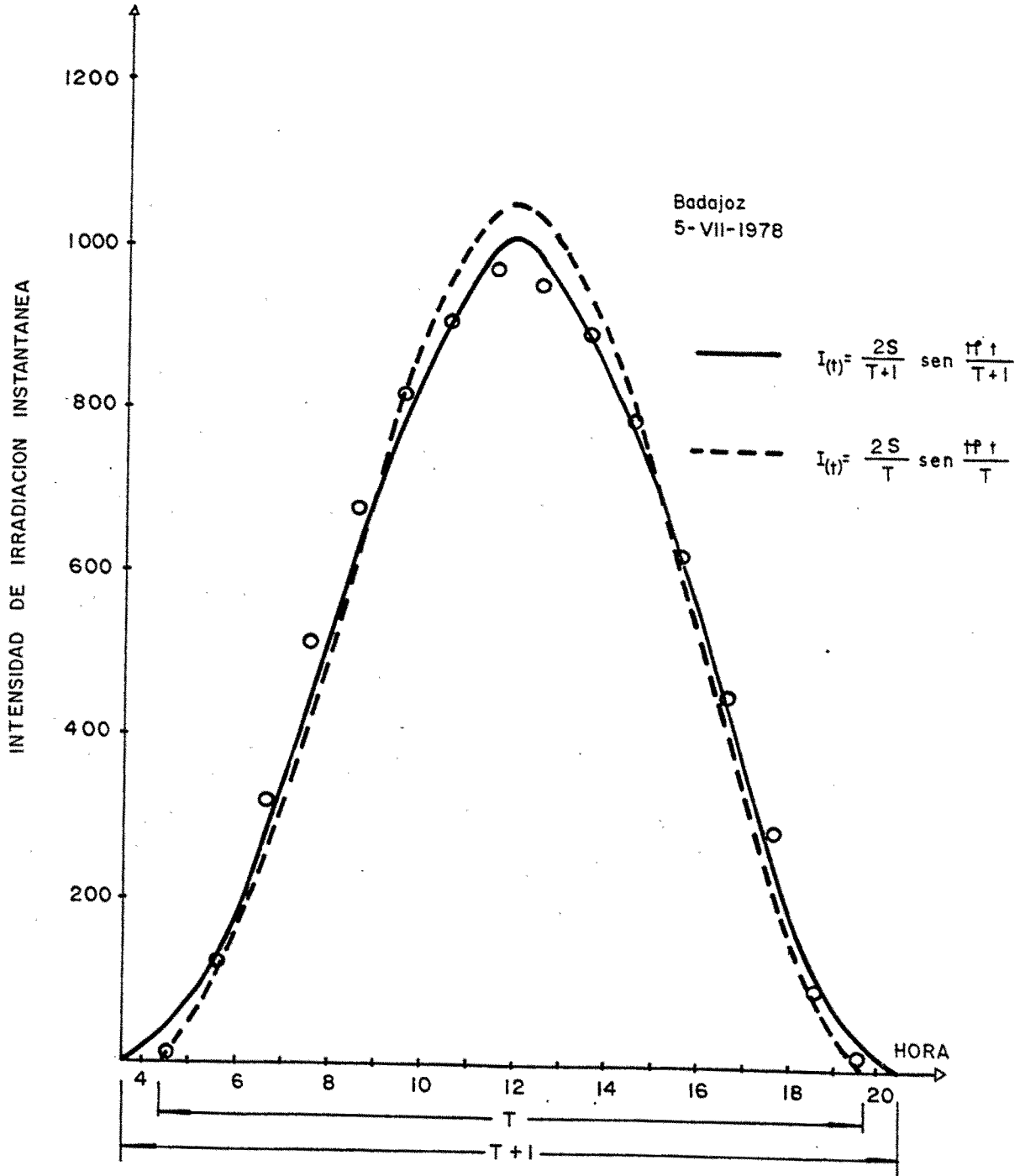


Figura 4.5

Por tanto para el caso de distribución de radiación solar instantánea en España se considerará la expresión:

$$I(t) = \frac{2S}{T+1} \text{sen}^2 \frac{\pi t}{T+1} \quad (4.2)$$

En la cual las variables tienen el mismo significado que en (4.1).

4.2.6. CONCLUSIONES RELATIVAS A RADIACION SOLAR

Dependiendo del tipo de estudio a realizar podemos necesitar los datos de radiación de dos formas diferentes:

- a)-Radiación solar global diaria.
- b)-Distribución a lo largo del día de la radiación solar.

El paso de a) a b) es inmediato y se puede aplicar la fórmula (4.2) por lo cual este segundo apartado puede quedar incluido dentro del primero.

Para la obtención de la radiación solar global diaria se deben utilizar los servicios del Instituto Nacional de Meteorología a través de:

- Datos de las estaciones meteorológicas, en el caso de que estén próximas al lugar que interese (también se pueden obtener datos de distribución temporal de la radiación).

-Publicaciones en forma numérica de los datos de la radiación en las estaciones meteorológicas en caso de proximidad del lugar requerido. Tiene la desventaja de que son datos registrados por lo cual podría ser necesario su tratamiento estadístico para obtener los datos que sean necesarios (valor medio, valores extremos...).

-Utilización de los mapas del Atlas de Radiación Solar en España (4) ya que tiene los valores medios de cada mes de la radiación solar e incluso los mapas de los valores extremos del año (meses de Junio y Diciembre).

La fórmula 1.6.1. del capítulo 1.1.2 de la presente tesis solo debe utilizarse como dato aproximado ya que no considera variables como la altura sobre el nivel del mar (en las figuras 4.2 y 4.3 se observa la influencia, con la definición por las líneas de nivel de las Sierras de Gredos, Sierra Nevada, Teide), o posibles microclimas o climas regionales debidos a otros muchos factores que con los mapas de radiación sí quedan considerados.

4.3. ESTUDIO DE LAS TEMPERATURAS AMBIENTALES

Para el estudio de las temperaturas en España y su aplicación a los efectos térmicos en puentes, se han consultado dos publicaciones del Instituto Nacional de Meteorología: "Guía resumida del clima en España" (11) y "Atlas climático de España" (12).

Los datos necesarios en el presente trabajo, se refieren a las temperaturas medias que puedan existir en un determinado lugar, y los valores máximos y mínimos de estas temperaturas medias. Por otro lado se precisa el rango de oscilación de la temperatura en un día alrededor del valor medio de ese día.

Las temperaturas medias para cada mes es un dato fundamental en las dos publicaciones (11) y (12), y se pueden obtener bien en forma numérica o en mapas con líneas de nivel de temperatura.

Los ejemplos de forma numérica se pueden comprobar en las figuras 4.6, 4.7, 4.8 y 4.9, referidas a los meses de enero y agosto como casos de temperaturas extremas y un resumen del conjunto del año. Los mapas de isoterma de las figuras 4.10 a 4.17 representan los datos de los meses de Enero y Agosto referidos a temperaturas máximas, mínimas,

Relación de valores NORMALES correspondientes a Observatorios Principales con datos del periodo 1.931 - .1960

Los significados de las letras simbólicas empleadas en el encabezamiento de cada columna de datos es el siguiente:

ALT:	Altitud en metros sobre el nivel del mar.
\bar{P} :	Presión media al nivel de la estación (en mm).
\bar{T} :	Temperatura media.
\bar{T}_M :	Temperatura media de las máximas.
\bar{T}_m :	Temperatura media de las mínimas.
T_M :	Temperatura máxima absoluta.
T_m :	Temperatura mínima absoluta.
\bar{R} :	Precipitación media mensual (en mm).
R_M :	Precipitación máxima en el mes o año.
R_D :	Precipitación en 24 horas en el mes o año.
\bar{H} :	Humedad relativa media.
\bar{D}_R :	Número medio de días de lluvia.
\bar{D}_N :	Número medio de días de nieve.
\bar{D}_G :	Número medio de días de granizo.
\bar{D}_T :	Número medio de días de tormenta.
\bar{D}_n :	Número medio de días de niebla.
\bar{D}_H :	Número medio de días de helada.
\bar{C} :	Número medio de días cubiertos.
\bar{D} :	Número medio de días despejados.
\bar{I} :	Número medio de horas de sol al mes o año.

Tanto los valores medios como extremos se refieren al periodo 1.931-60, con excepción de Oviedo cuyos datos se refieren al periodo 1.901-30.

Al lado del nombre del Observatorio figura el número de años de que se ha dispuesto de datos.

Figura 4.6

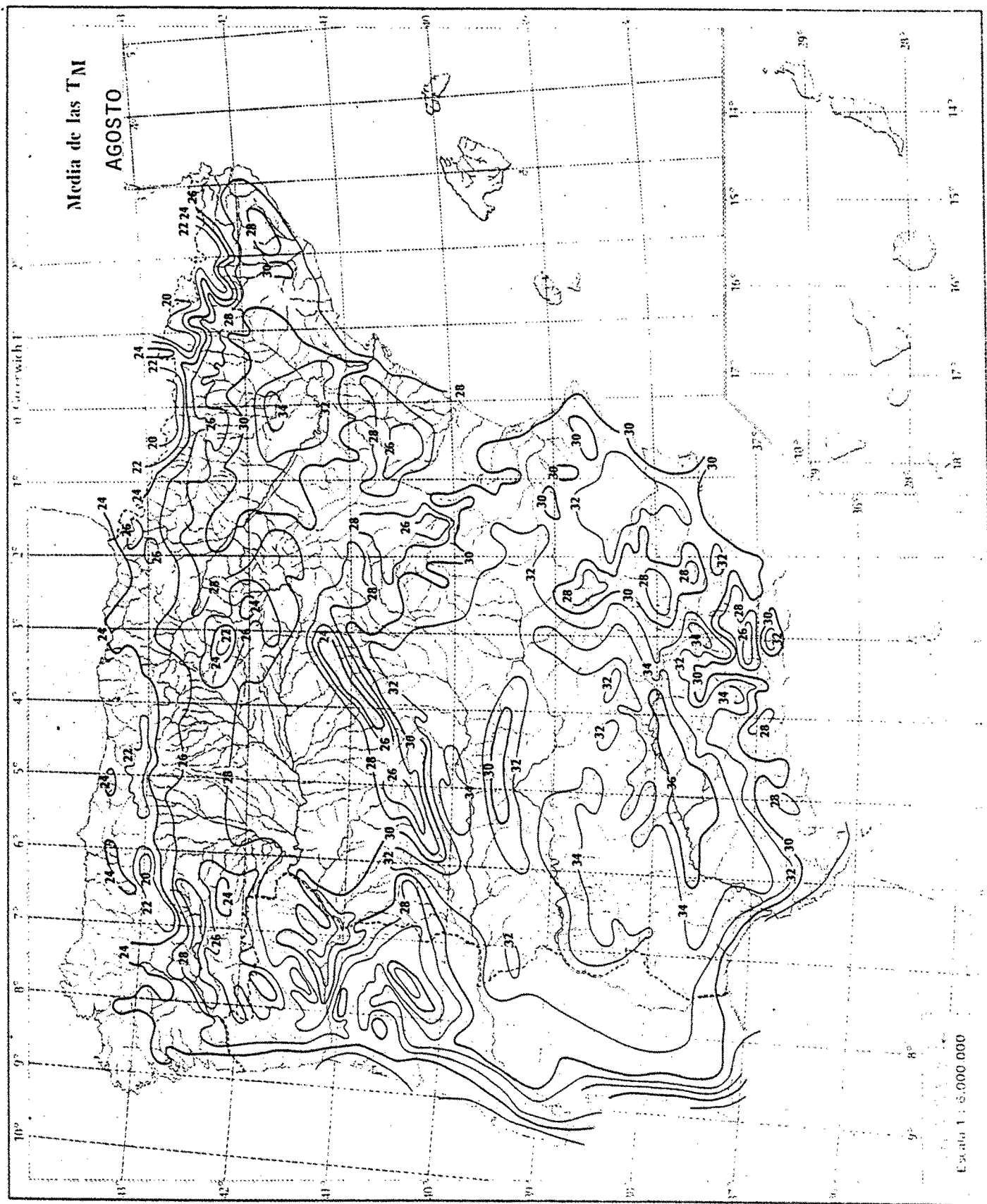


Figura 4.10

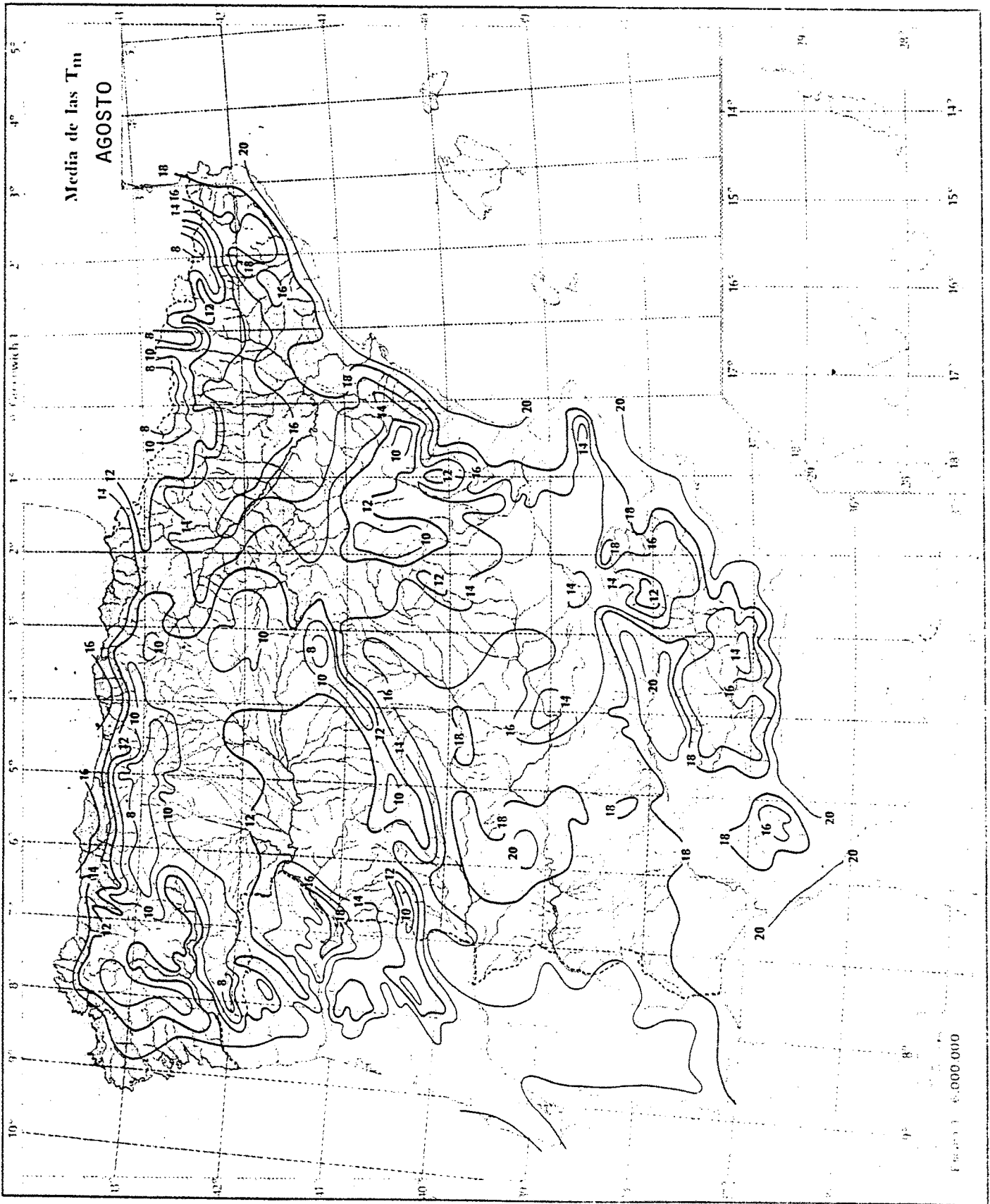


Figura 4.11

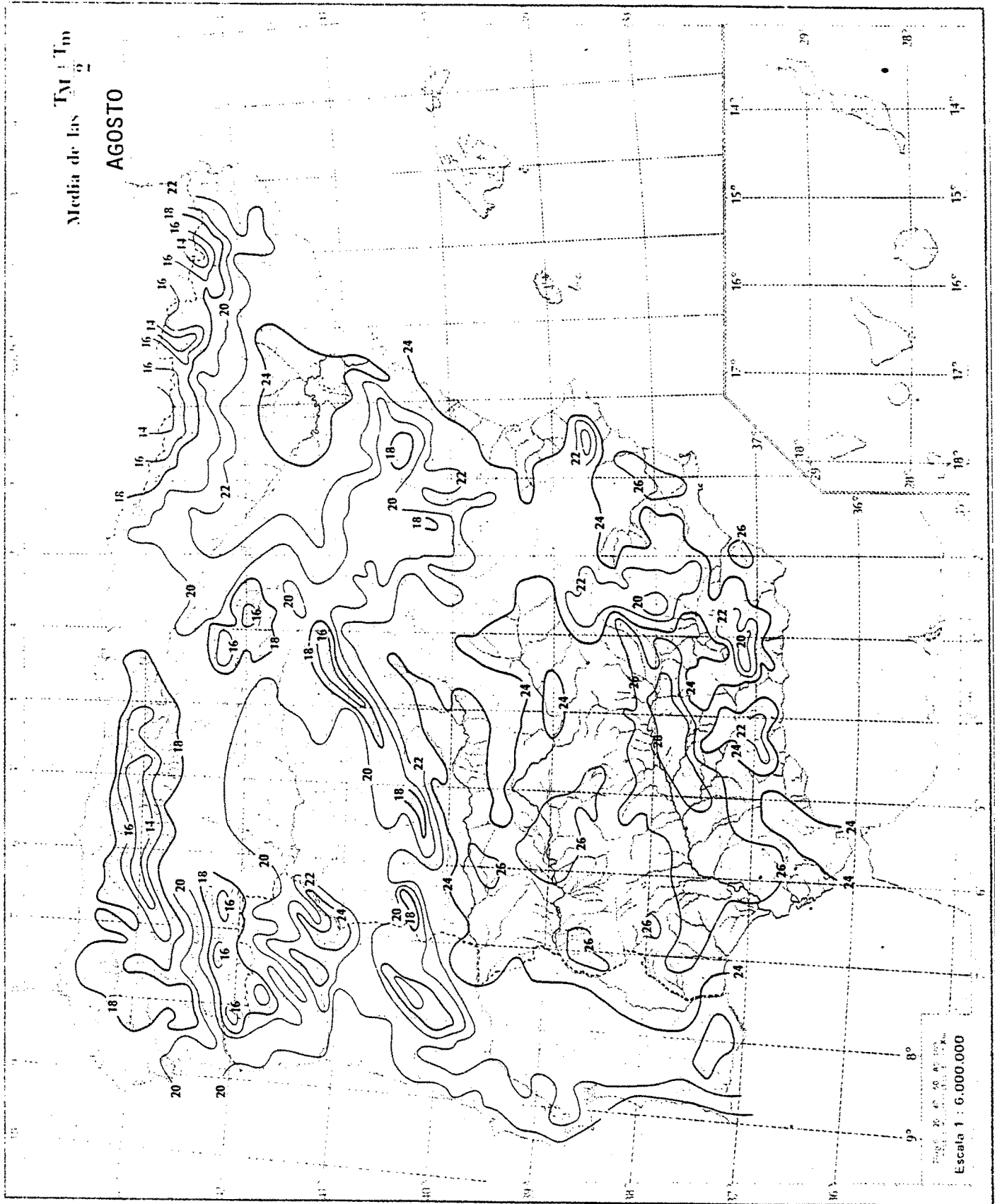


Figura 4.12

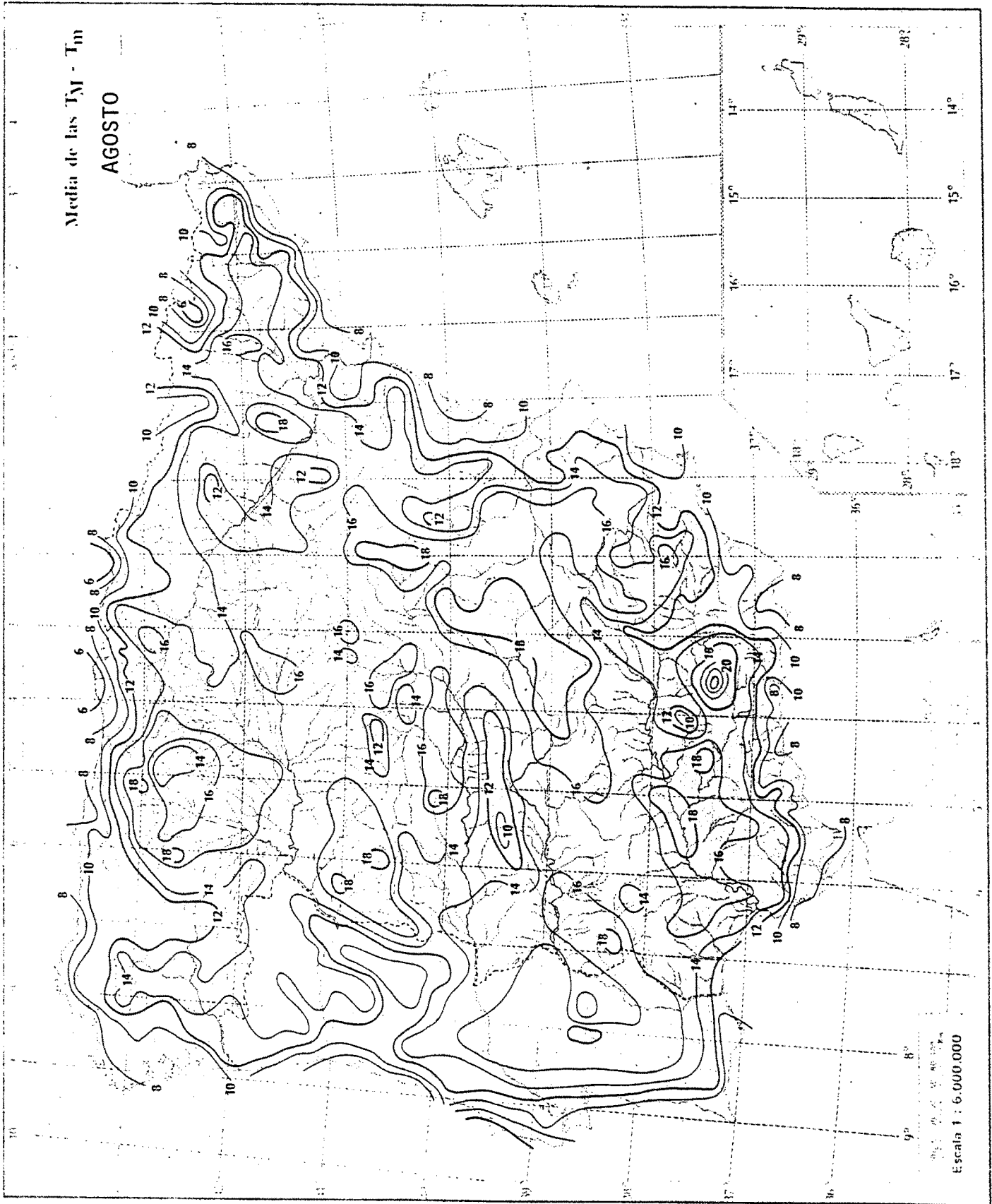


Figura 4.13

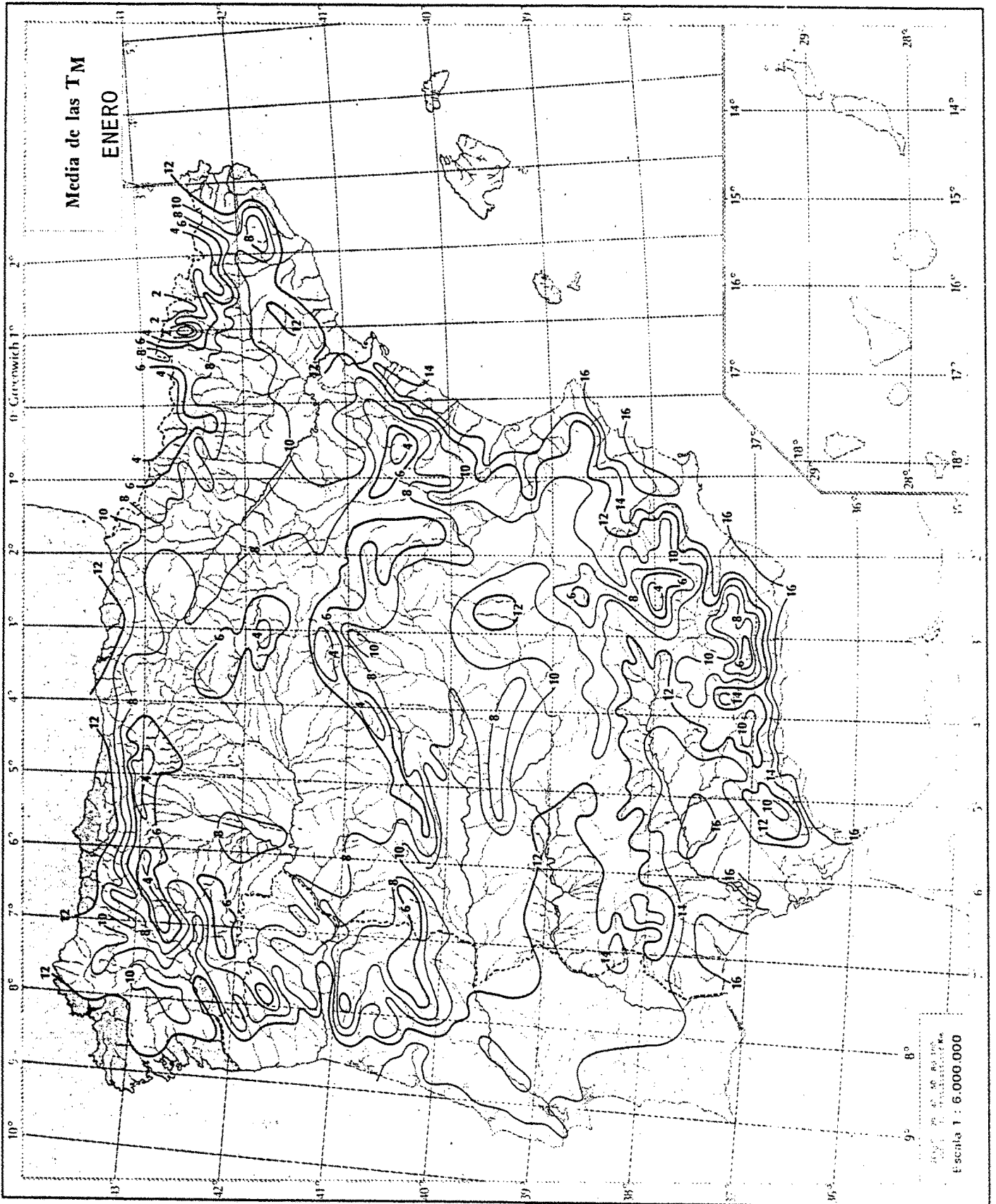


Figura 4.14

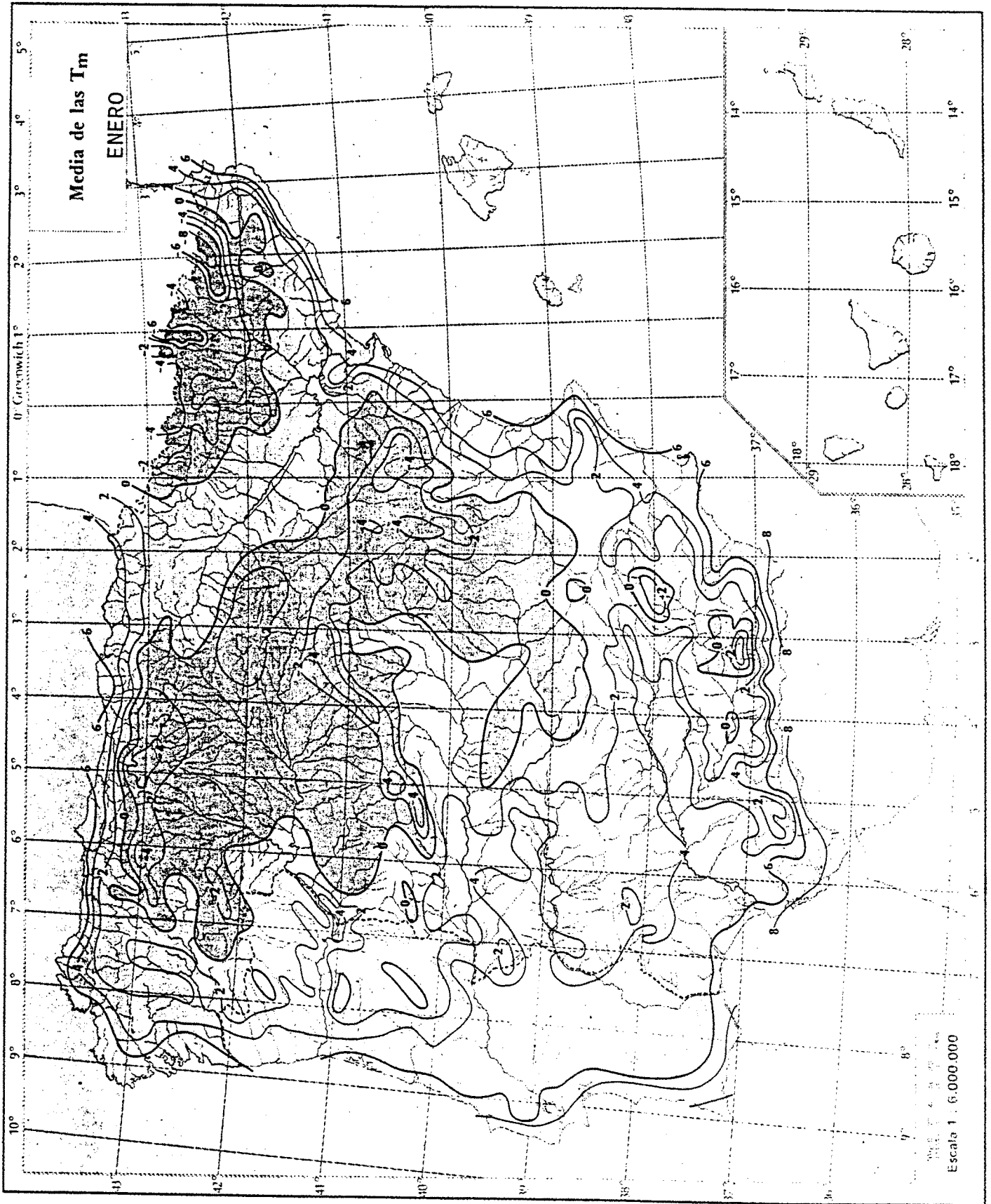


Figura 4.15

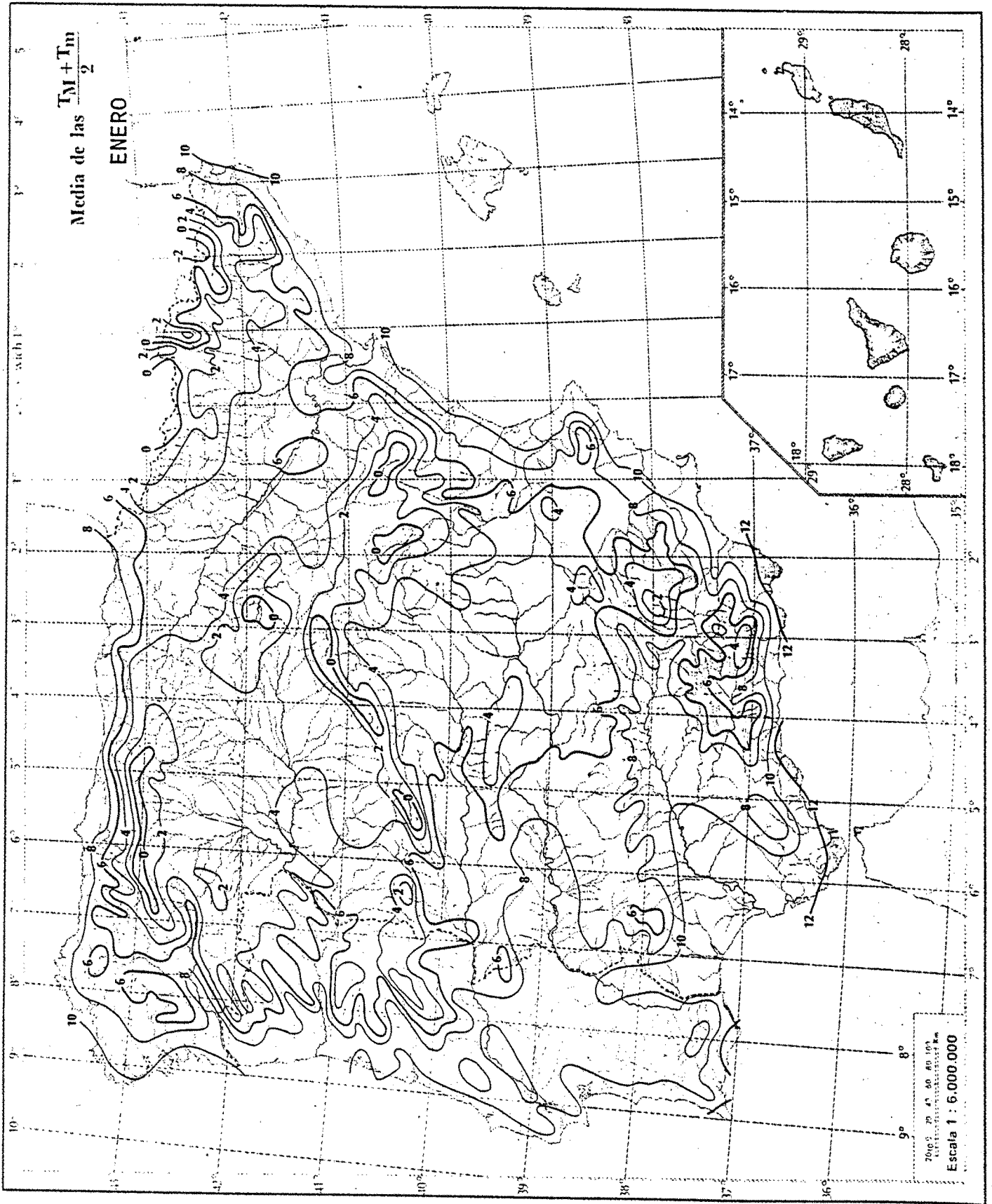


Figura 4.16

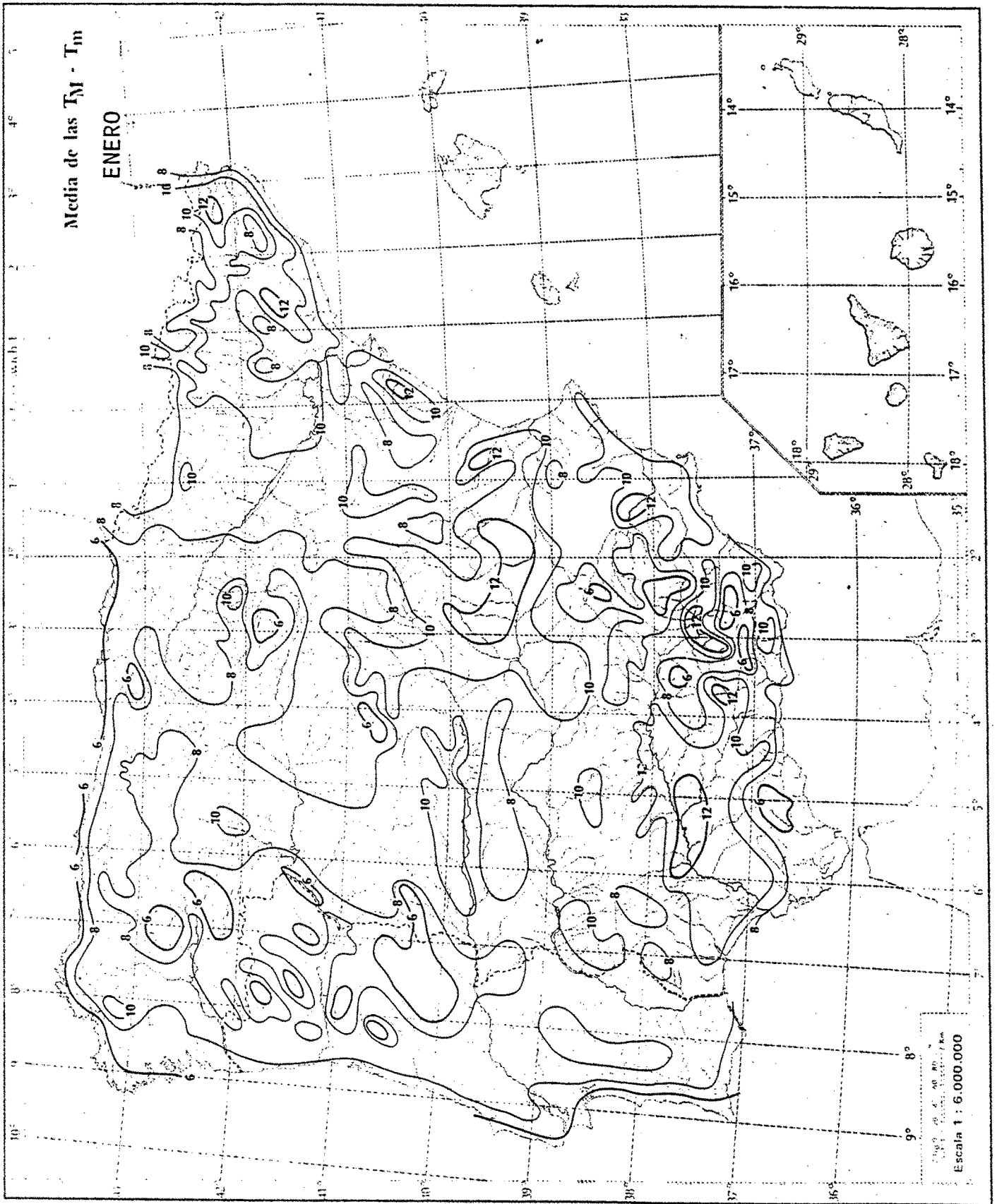


Figura 4.17

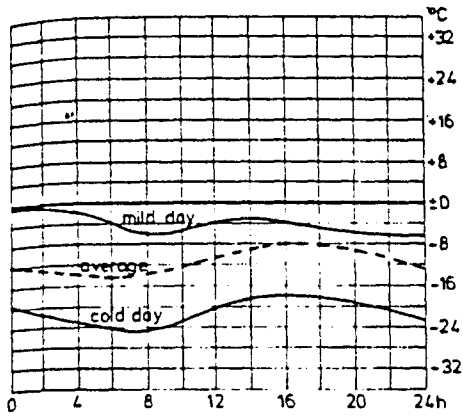
media (semisuma de máxima y mínima) y oscilación de la temperatura (máxima menos mínima).

Del análisis de los mapas de temperaturas se deduce que la oscilación diaria de temperatura es mayor en verano que en invierno y que llega a alcanzar en zonas altas 20°C de oscilación diaria de media del mes y en algunas zonas de Sierra Nevada llega a 24°C de oscilación media diaria. En invierno la oscilación de temperatura es normalmente inferior a 14°C .

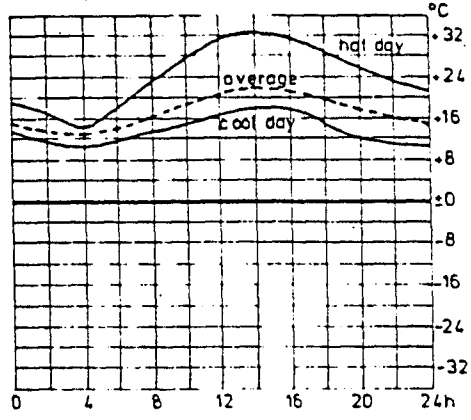
Conocido ya el dato de las temperaturas medias y de las oscilaciones diarias de temperatura (que dependen de la media) queda por definir la distribución de temperaturas a lo largo del día.

En la literatura sobre el tema se han usado diversas distribuciones pero básicamente coinciden todos los casos en suponer una distribución sinusoidal a lo largo de todo el día, por ejemplo las figuras 4.18 (1) y 4.19 (2). También se ha usado una distribución tipo diente de sierra

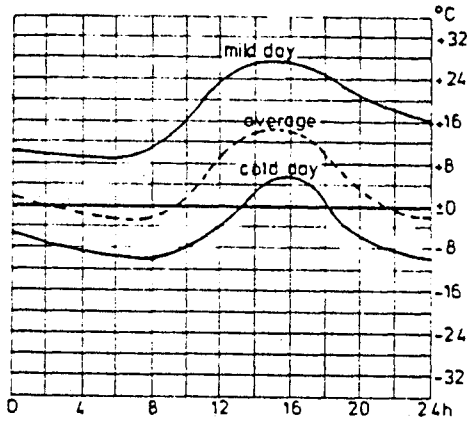
Ambas distribuciones se han considerado en la presente tesis. La distribución en diente de sierra se ha utilizado en el programa BRIDGE por su utilidad ya que al efectuar por separado el cálculo diurno y el nocturno, basta con definir un triángulo en cada caso.



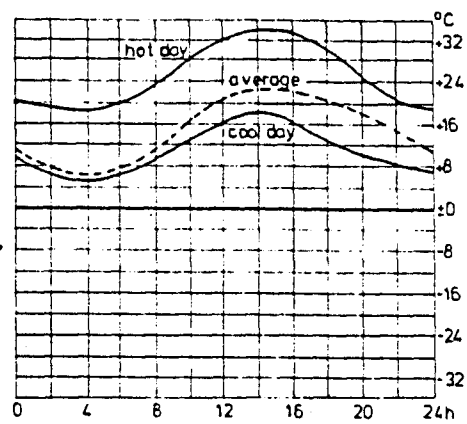
Daily variation of air temperature in Berlin (winter)



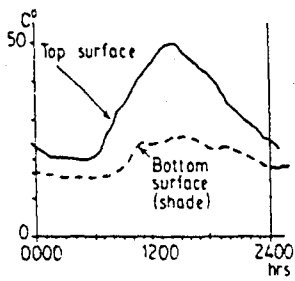
Daily variation of air temperature in Berlin (summer)



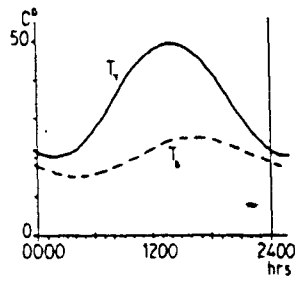
Daily variation of air temperature in winter Paris surroundings (39)



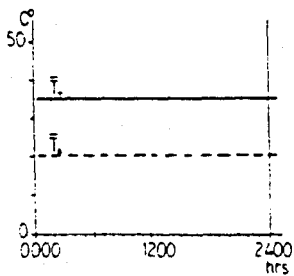
Daily variation of air temperature in summer Paris surroundings (39)



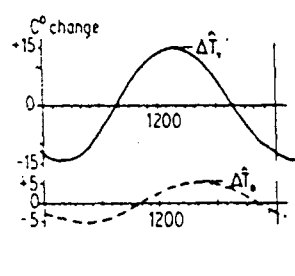
(a) Surface Temperatures



(b) Sinusoidal Idealisation



(c) Average Temperatures



(d) Surface Fluctuations

Figura 4.18.

Figura 4.19.

Temperatures at top and bottom surfaces of bridge deck during one day

En el programa bidimensional ha sido preferible la utilización de distribución senoidal de temperatura ya que el cálculo se efectúa para un día completo que corresponde al período de la onda.

4.3.1. CONCLUSIONES RELATIVAS A TEMPERATURAS AMBIENTALES

El método propuesto en la presente tesis relativo a temperaturas ambiente es similar al propuesto para el caso de la radiación:

-Localización geográfica de la estructura sobre los mapas descritos anteriormente (figuras 4.10 a 4.17) y lectura de los datos básicos:

.Máxima diferencia de temperaturas anuales registradas (figura 4.9 en forma numérica), para obtención del dato necesario para el estudio del movimiento longitudinal del tablero.

.Temperatura media en agosto y oscilación de temperatura para definir el máximo gradiente positivo (temperatura en borde superior mayor que en borde inferior). Se debe utilizar para estudiar en condiciones extremas de temperatura como oscilación de la temperatura el valor de la media de las máximas menos la media de las medias multiplicado por dos.

$$2(T_M - \frac{T_M + T_m}{2})$$

.Temperatura media en enero y oscilación de temperatura para definir el máximo gradiente negativo (temperatura en borde inferior mayor que en borde superior. También se debe utilizar como oscilación el valor de la media de las medias menos el valor de la media de las mínimas multiplicada por dos.

$$2(\frac{T_M + T_m}{2} - T_m)$$

CAPITULO IV

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- (1) COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETON (CEB). *Bulletín d'información n.º167. Enero, 1985.*
- (2) HAMBLY, E.C. "Temperature distributions and stresses in concrete bridges". *The structural engineer. Vol. 56A, N.º5. pp. 143-148. May, 1978.*
- (3) EMERSON, M. *The calculation of the distribution of temperatura in bridges. Ministry of Works. TRRL Report LR561. Crowthorne 1973.*
- (4) FONT TULLON, I. *Atlas de la radiación solar en España. Instituto Nacional de Meteorología. Madrid, 1984.*
- (5) GLOYNE, R.W. *The diurnal variation of global radiation on a horizontal surface with spetial reference to Aberdeen. Meteorological Magazine. Vol. 101. Febero 1972. pp. 44-51.*
- (6) INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. *Radiación Solar en España. Años 1957 a 1973. Instituto Nacional de Meteorología. Madrid, 1974. Segunda edición 1984. Publicación D-34.*
- (7) INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. *Radiación Solar en España. Año 1974. Instituto Nacional de Meteorología. Madrid 1976. Publicación D-37.*
- (8) INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. *Radiación Solar en España. Años 1975 y 1976. Inst. Nac. Met. Madrid, 1980. Publicación D-39.*
- (9) INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. *Radiación Solar en España. Años 1977 y 1978. Inst. Nac. Met. Madrid 1982. Publicación D-40.*
- (10) INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. *Radiación Solar en España. Años 1979 y 1980. Inst. Nac. Met. Madrid, 1983. Publicación D-41.*
- (11) INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. *Guía resumida del clima en España. Inst. Nac. Met. Madrid, 1982. Publicación D-25.*

- (12) INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. *Atlas climático de España*. Inst. Nac. Met. Madrid, 1983.
- (13) INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. *Calendario Meteorológico 1983*. Inst. Nac. de Met. Madrid, 1983.
- (14) MONTEITH, J.L. *Light distribution and photosynthesis in field crops*. *Aun. Bot. London*, 29. 1965. pp. 17-37.

CAPITULO V

INFLUENCIA DE LAS ARMADURAS EN
LA CONDUCTIVIDAD DEL HORMIGON

5.1. INTRODUCCION

La determinación de la conductividad de cualquier sustancia es relativamente difícil dependiendo de la precisión con que se desee este valor, por la gran cantidad de factores que entran en juego.

Cuando se trata de un material no homogéneo como es el hormigón armado, este hecho se complica aún más, ya que los diferentes materiales constituyentes son de tamaños macroscópicos y su influencia se extiende a distancias de tamaño finito, por lo que se debe considerar un sólido de dimensiones suficientemente grandes con respecto a las singularidades.

Según la ley de Fourier (capítulo 1.1) la conductividad de un material es la constante de proporcionalidad entre la densidad de flujo de calor y el gradiente de temperaturas. Para ello, se supone un régimen estacionario que, definidas estas dos variables, permite determinar la constante de proporcionalidad llamada "conductividad".

En el punto siguiente se determinará el valor de la conductividad relativa del hormigón armado frente al hormigón en masa, y en el punto 5.3. se estudiarán las ampliaciones que supone el régimen no permanente.

5.2. INFLUENCIA DE LAS ARMADURAS EN REGIMEN PERMANENTE

En el apartado 1.1.1.6.1. de esta tesis se hace un estudio de las variables que influyen en la conductividad del hormigón en masa y se comprueba la dispersión de sus valores, por tanto, la conductividad relativa del hormigón armado frente al hormigón en masa deberá hacerse con el mismo hormigón para eliminar esas perturbaciones y poder achacar a las armaduras las diferencias obtenidas.

Se suponen dos cilindros del mismo radio R_2 de un material como el hormigón de conductividad $k_H = 1,4 \text{ W/m.K}$ y en uno de ellos se supone con un cilindro interior concéntrico de radio R_1 de acero, con una conductividad $k_a = 50,0 \text{ W/m.K}$.

Se supone una temperatura constante T_0 en un extremo y otra temperatura constante T_1 en el otro extremo y se calcula la cantidad de calor que pasa por una parte a otra de los cilindros, suponiendo adiabática la superficie curva del cilindro.

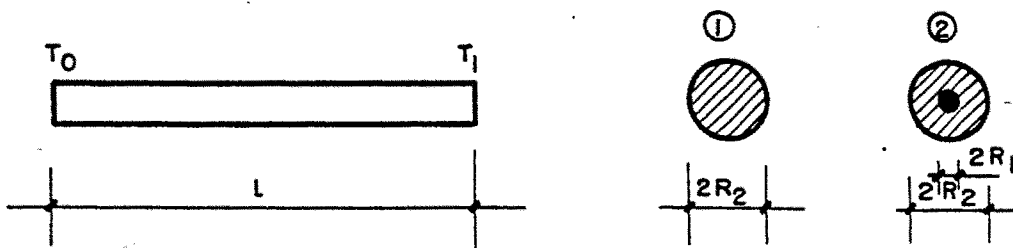


Figura 5.1

En el caso 1 cantidad de calor transmitida será:

$$Q_1 = \frac{T_0 - T_1}{1} \pi R_2^2 H \quad (5.1)$$

En el caso 2 esta cantidad será:

$$Q_2 = \frac{T_0 - T_1}{1} \pi \{R_2^2 k_H + R_1^2 (k_a - k_H)\} \quad (5.2)$$

Si efectuamos el cociente se obtiene:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{(R_2/R_1)^2}{(R_2/R_1)^2 + (k_a/k_H - 1)} \quad (5.3)$$

Para los casos de acero y hormigón considerado, se tendrá:

$k_a/k_H \approx 36$ y por tanto:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{(R_2/R_1)^2}{(R_2/R_1)^2 + 35} \quad R_2 > R_1 \quad (5.4)$$

Representando esta figura se obtiene:

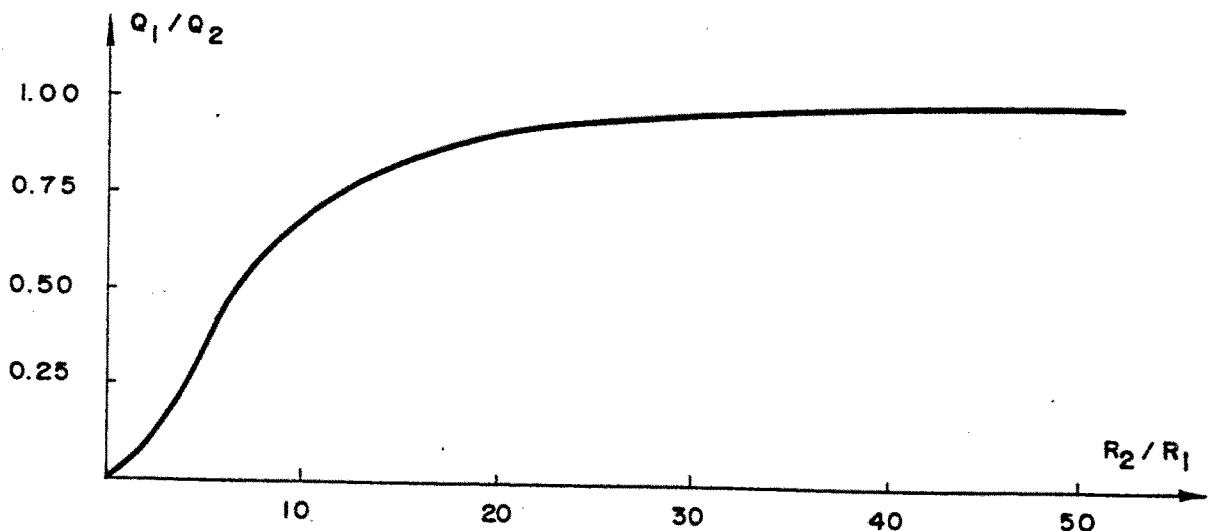


Figura 5.2

De esta figura se puede concluir que cuando la relación de radios es próxima a 20 el cociente entre las cantidades de calor transmitidas es 0,90, es decir, la cantidad de calor que pasa por un cilindro de hormigón en masa, es el 90% del que pasa por otro cilindro con una barra de acero en su interior, con relación de radios igual a 20.

Este valor es importante ya que las armaduras verticales generalmente utilizadas en puentes son redondos $\varnothing 8, \varnothing 10, \varnothing 12$ y $\varnothing 14$, excepto en los casos de almas de secciones cajón. La distancia entre dichas armaduras también oscila entre 0,10 y 0,25 m. y por tanto, el área de hormigón al que "afecta" cada armadura, estaría en relación de radios próximo a 20 o por lo menos entre 14 y 30.

Por tanto, podríamos concluir que la relación entre cantidades de calor transmitidas en régimen estacionario en cada uno de los casos está entre el 80% y el 95%, esto supone que el efecto de la armadura en el hormigón equivale a una conductividad ficticia del hormigón del 5% al 25% mayor, según los casos.

5.3. INFLUENCIA DE LAS ARMADURAS EN REGIMEN TRANSITORIO

Según la ley de Fourier en flujo permanente unidimensional, el concepto de la conductividad es matemáticamente muy sencillo, sin embargo cuando se considera un flujo transitorio de tipo periódico, a lo largo de un número suficientemente elevado de períodos el flujo de calor es cero y por tanto, se deben buscar otros métodos de determinación de la conductividad.

En la teoría de la transmisión de calor, la magnitud más sencilla de medir es la temperatura y por tanto las medidas experimentales de determinación de la conductividad se efectuarán midiendo los valores de las temperaturas y comparando estos valores con los teóricos y de esta forma poder ajustar el valor de la conductividad.

Si se supone un sólido semiinfinito o una varilla con la superficie curva aislada, y sobre la superficie (o la sección, en el caso de la varilla), se impone una variación de temperatura de tipo senoidal:

$$T = T_0 \cdot \text{sen } \omega t \quad (5.5)$$

en todo el espacio (o a lo largo de la varilla) se producirá una distribución que, pasado el tiempo de perturbación para eliminar la influencia de las condiciones de contorno será, según Carslow y Jaeger (1) :

$$T = T_0 e^{(-x\sqrt{\omega/2\alpha})} \cdot \text{sen}(\omega t - x\sqrt{\omega/2\alpha}) \quad (5.6)$$

en la cual

T = temperatura a profundidad x .

T_0 = variación máxima de temperatura en superficie.

α = difusividad del material.

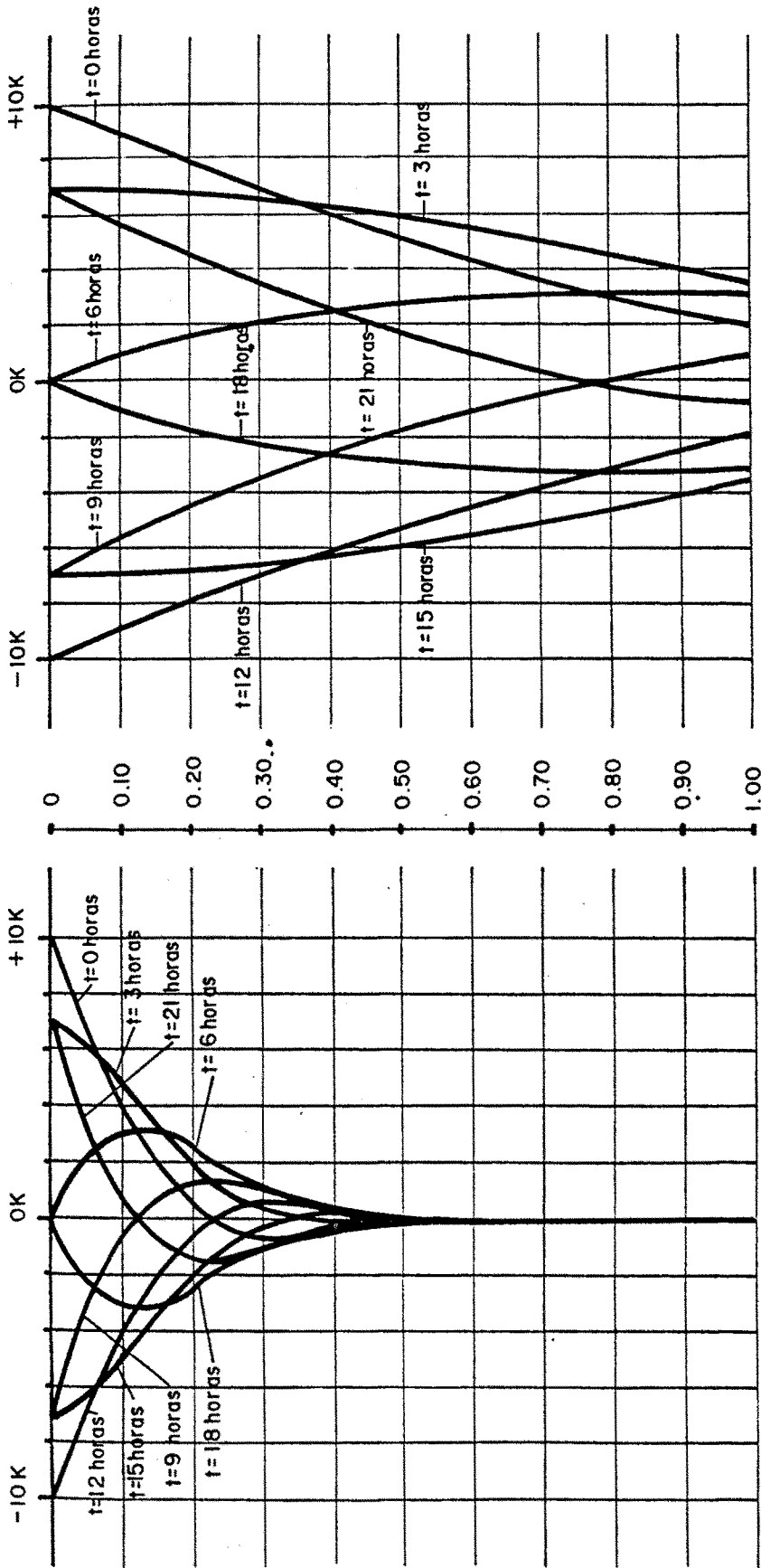
t = tiempo en horas.

ω = frecuencia (si el período es un día: $\omega = 2\pi/24$).

En la figura 5.3 se muestran los diagramas de temperaturas del hormigón en masa y del acero para una onda de período 24 horas y variación en superficie de 10°C sobre un semiespacio infinito o una varilla de longitud infinita por uno de sus extremos.

Un primer dato importante que se obtiene de esta figura, es que la onda térmica de período un día, penetra en el interior del hormigón hasta una profundidad de únicamente 0,30 ms ó 0,40 ms, ya que a 0,30 ms la máxima variación de temperatura es aproximadamente el 10% de la variación máxima y a 0,40 ms esta variación es solamente del 5%.

La segunda observación importante surge de la comparación entre las dos figuras, ya que, por ejemplo considerando el caso del hormigón armado, un punto de contacto entre acero y hormigón situado a una profundidad de 0,30 ms y con una variación senoidal de la temperatura en superficie de 10°C , si se consi-



HORMIGON
 $T = T_0 \cos \frac{2\pi t}{24}$
 $T_0 = 10 \text{ }^\circ\text{C}$

Difusividad = $6.1 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{seg}$ ACERO
 Difusividad = $1.0 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{seg}$

Temperaturas en macizos seminfinitos de hormigón y acero con variación sinusoidal de la temperatura ambiente.

Figura 5.3.

dera la parte de acero variará su temperatura 7°C y si se considera como hormigón variará solamente 1°C por lo que será preciso un flujo de calor transversal que equilibre la temperatura de ambos puntos.

Por tanto, la determinación experimental de la conductividad del hormigón armado deberá hacerse de dos posibles maneras:

- Determinación en un bloque suficientemente grande (comparado con las armaduras) del flujo total de calor y aplicar la ley de Fourier a un flujo permanente.
- Establecimiento en un cilindro con una armadura centrada del campo de temperaturas para una variación senoidal de la temperatura en la superficie. En este caso el contraste teórico se debe hacer con un programa de transmisión de calor en tres dimensiones o en dos dimensiones en coordenadas cilíndricas.

El primer caso tiene bastantes dificultades por la precisión de la medida de temperaturas (se necesitaría precisión de centésimas de grado, y la mayoría de termopares o termistores tienen precisión de una décima) y además la conductividad del hormigón varía con la temperatura al variar el contenido en agua por lo que no se puede actuar con un gradiente muy elevado de temperatura.

Por tanto, se deberá seguir el segundo método pudiendo variar las condiciones de contorno por otras que se puedan determinar analíticamente 1 o numéricamente. La obtención de una solución analítica será muy difícil de conseguir por lo que será preciso recurrir casi siempre a una solución teórica numérica para contrastar con la solución experimental.

No obstante el tipo de condiciones de contorno que se pongan al experimento deberán ser muy parecidas a las que tenga el material en servicio, y además se deberán cumplir las condiciones generales para la determinación de la conductividad del hormigón en masa y que se recogen en la bibliografía (2) , (3) , (4) , (5) .

En el caso de estructuras, el problema viene complicado por el hecho de que normalmente las armaduras deben tener un recubrimiento mínimo de hormigón, por lo que la temperatura en el acero no es fijada como condición de contorno, sino que es función de la cantidad de calor recibida a través del propio hormigón, esto hace que el efecto de las armaduras sea posiblemente mucho menor que en el caso teórico planteado, siendo el hormigón el material predominante a efectos térmicos.

La presencia de armaduras únicamente contribuiría a un flujo secundario de calor de la zona de hormigón más calientes a los más fríos, siendo por tanto, su efecto beneficioso ya que en cualquier caso tendería a reducir los gradientes térmicos existientes.

tentes en el seno del hormigón. Dados los valores anteriormente apuntados dicho efecto siempre será al menos de un orden de magnitud inferior. Por otra parte, dado que la distribución de tales armaduras puede variar considerablemente, el estudio general de su efecto es prácticamente inviable, considerándose suficiente para el fin que se persigue en esta tesis con las acotaciones dadas. En cualquier caso, el efecto en régimen transitorio como el que nos ocupa, siempre será inferior al caso permanente por lo que éste puede tomarse como una cota de tales efectos. Por otra parte, y dado que las posibles modificaciones a que puede dar lugar su introducción en el problema van en el sentido apuntado de reducir los esfuerzos de tipo térmico, una medida de seguridad puede ser no tenerlos en cuenta a la hora de evaluar estos últimos, quedando por tanto del lado de la seguridad y con la tranquilidad de que sus efectos no son de mayor importancia.

La comprobación rigurosa del efecto de las armaduras exigiría la realización de un modelo tridimensional de suficiente tamaño como para minimizar los efectos locales de las armaduras y con una discretización lo bastante fina como para poder representar adecuadamente cada armadura. Tal modelo está claramente fuera del alcance de los medios informáticos disponibles en este momento en esta Universidad y dados sus posibles resultados tampoco se consideró indispensable su realización.

CAPITULO V

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- (1) CARSLow, H.S.; JAEGER, J.G. "Conduction of heat in solids". Second Edition. Ed. Oxford University (1959).
- (2) COLLEPARDI, M. "Scienza e tecnologia del calcestruzzo". Ed. Ulsico Hoepli. Milano (1980).
- (3) LOUDON, A.G.; STACY, E.F. "The thermal and acoustic properties of lightweight concrete". Structural Concrete. Vol.3. No.2, pp. 58-95. London (March-April) (1966).
- (4) MARECHAL, J.C. "Comportement mécanique du béton en fonction de la temperature". Assoc. Scient. Précont. 11^o Session. Paris. Mars (1959).
- (5) NEVILLE, A.M. "Properties of concrete". Ed. Pitman. (1975).

C A P I T U L O VI

CLASIFICACION DE LOS TABLEROS DE
PUENTE A EFECTOS TERMICOS

6.1.- INTRODUCCION

Una clasificación de los tableros de puente desde el punto de vista de su comportamiento térmico, debería tener en cuenta una serie de factores como son:

- Geometría de la sección.
- Número de materiales diferentes que lo componen.
- Propiedades térmicas de sus materiales.
- Posibilidad de huecos interiores.

La influencia de la geometría de la sección está íntimamente ligada al tipo de onda térmica que recibirá el tablero. Esta onda se considerará de período un día y corresponde a la variación diaria de temperaturas.

La oscilación diaria de la temperatura ambiente afecta de forma apreciable a un macizo de hormigón en una profundidad entre 25 y 30 centímetros, mientras que una onda de tipo semanal o incluso algo menor afecta a toda la masa de un tablero de puente y solamente produce corrimientos del total del tablero pero no gradientes de temperatura en el mismo.

Sabiendo (capítulo 5) que la onda diaria de temperaturas afecta aproximadamente a 30 cms, se considerará este dato para la clasificación de los tableros a efectos térmicos.

Así por ejemplo, un puente de vigas, con espesor de paredes medio de 0,20 ms, con las condiciones atmosféricas en ambas caras de la pared, estará afectado decisivamente en todos sus puntos por la onda térmica diaria, mientras que una losa de 1,00 ms de espesor solo estará afectada en una parte de la misma por esa onda diaria de temperaturas, e influirá la historia térmica en su campo de temperaturas.

Respecto al número de materiales que componen el tablero y su forma de empleo, se refiere al caso del acero y el hormigón en un puente mixto considerados como diferentes materiales, o al material "hormigón armado" considerado como un solo ente de propiedades únicas y conjuntas como adición de dos materiales, o la capa de rodadura de material bituminoso, o al aire de los huecos interiores como otros materiales a considerar independientemente con sus propiedades particulares.

Los huecos interiores, como es el caso de las losas aligeradas o a los puentes de sección cajón, tienen gran importancia ya que este aire encerrado, sin movimiento, se comporta como un aislante comparado con el hormigón debido a su pequeña conductividad térmica frente a la de éste, lo que hace que el calor se transmita a través del hormigón y no a través de los huecos interiores de aire preferentemente.

6.2. TIPOLOGIA ACTUAL

La tipología actual de tableros de puentes importantes en España (básicamente pretensados) se puede contemplar de forma resumida en las publicaciones "Hormigón pretensado. Realizaciones españolas" (1) de la Asociación Técnica Española de Pretensado. Los tableros de puente construidos podríamos clasificarlos inicialmente, desde el punto de vista térmico, de la forma:

- Losas macizas.
- Losas aligeradas.
- Puentes de vigas.
- Puentes de sección cajón.

En cuanto al número de puentes construidos en España de cada uno de estos tipos, la mayor parte de ellos corresponde a los puentes de vigas, de los cuales no existe una estadística por el elevado número de los mismos.

El número de ejemplos publicados (1) de puentes de sección losa y sección cajón es prácticamente igual entre sí y oscila alrededor de 20 ejemplos de cada uno, por tomo de las publicaciones mencionadas; esto indica que del número de puentes importantes que se construyen en España es igual el número de losas, macizas o aligeradas, pretensadas, que el de puentes de sección cajón. Aunque la cantidad total cons

truída no coincide con las publicadas, por ser estas únicamen
te los ejemplos más representativos, se puede suponer que la
relación entre ambos tipos de puente sí se mantiene.

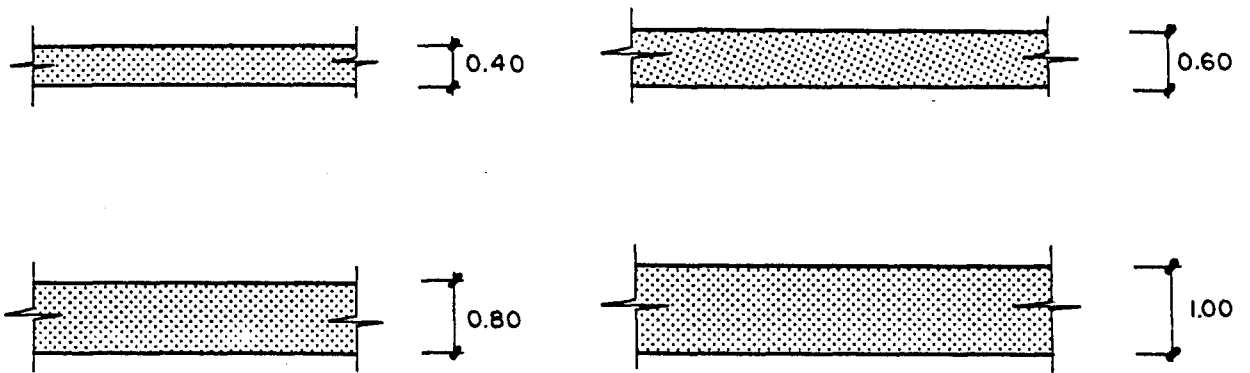
6.3. CLASIFICACION DE TABLEROS

Emerson (2) hace la primera clasificación de los tableros de puente de hormigón que clasifica en puentes losa y puentes de sección cajón con el fin de estudiar como una sola pieza o como dos forjados independientes. Priestley (5) considera siete secciones de tablero de puente diferentes: tres losas macizas, puente de vigas, sección en , sección cajón monocelular y cajón multicelular. Otros autores. Leonhard, (4) Faulkner (3) , también diferencian el caso de puentes losa del caso de puentes de sección cajón.

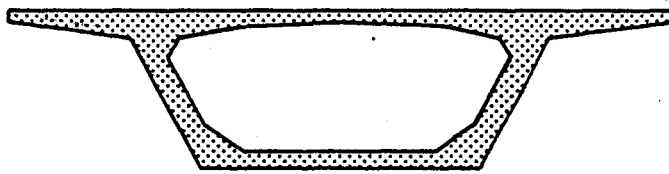
En la presente tesis se considerará la siguiente clasificación de tableros de puente, a efectos térmicos:

- Puentes losa maciza, de canto 0,40 ms, 0,60 m, 0,80 ms y 1,00 ms, que corresponden a luces entre 10,00 y 20,00 ms y que abarcan a puentes de hormigón armado y pretensado.
- Puentes de sección cajón monocelular que se tratarán como dos forjados en el estudio unidimensional, o en su totalidad en el estudio bidimensional.
- Tableros con aligeramientos, formado por las losas aligeradas y por los tableros de sección multicelular.

CLASIFICACION DE TABLEROS DE PUENTE SEGUN SU
COMPORTAMIENTO TERMICO



PUENTES CON TABLERO DE SECCION LOSA



PUENTE CON TABLERO DE SECCION CAJON



PUENTE CON TABLERO DE SECCION MULTICELULAR



PUENTE DE VIGAS

Figura 6.1.

-Otro apartado lo constituyen los puentes de vigas en su generalidad, debido a su similar comportamiento térmico.

C A P I T U L O VI

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- (1) ATEP. Hormigón pretensado. Realizaciones españolas. Tomos I, II y III. 1970. 1974. 1978. Instituto Eduardo Torroja.
- (2) EMERSON, M. The calculation of the distribution of temperature in bridges. Departement of the Environment. TRRL. Report LR 561. Crowthorne. England. 1973.
- (3) FAULKNER, H. Contribution al Task Group "Thermal Effects". II Comisión CEB. Budapest. Junio, 1980.
- (4) LEONHARDT, F. Vorlessungen uber Tomo 6. Ed. Springer-Verlag. 1979.
- (5) PRVESTLLEY, M.J.N. Design thermal gradients for concrete bridges. New Zealand Engineering. Vol. 31. Part. 9. pp. 213-219. Septiembre, 1976.

CAPITULO VII

7.1. ESTUDIO UNIDIMENSIONAL DEL ESTADO TERMICO DE TABLEROS DE PUENTE

7.1.1. INTRODUCCION

La ecuación general de conducción de calor tiene gran dificultad de resolución matemática por lo que efectuando las simplificaciones indicadas en el Capítulo 2.2 podemos llegar a una expresión de la ecuación que gobierna el flujo de calor, en una dimensión, en un puente (fórmula 2.5).

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} = \frac{\rho C}{k} \frac{\partial t}{\partial \tau} \quad (7.1)$$

Este análisis unidimensional es suficiente para poder estudiar el campo de temperaturas en el puente que define el estado térmico del mismo y de esta forma poder efectuar un análisis paramétrico de las variables que influyen en el

estado térmico y por consiguiente en el estado tensional del puente.

Para caracterizar el estado térmico del puente se considerará una serie de funciones que lo caractericen y que fundamentalmente son:

- a) El campo de temperaturas en el puente, y en particular las temperaturas máximas y mínimas del puente cada hora, o bien cada día.
- b) La temperatura efectiva que se define como la temperatura media del puente que rige el movimiento longitudinal del puente.
- c) La energía absorbida o emitida por el puente a lo largo del tiempo.

El estado tensional del puente puede ser considerado a partir de una serie de funciones de tipo tensional o de deformación:

- a) Tensiones de autotensión (máximas o mínimas).
- b) Movimiento longitudinal o dilatación del puente.
- c) Curvatura del puente debido al estado térmico.

tanto el estado térmico como el tensional, que se caracterizará por las funciones anteriormente citadas dependen de numerosas variables, que fundamentalmente son de tipo geométrico y de tipo ambiental.

Las variables de tipo geométrico se refieren al tablero del puente en sí, como por ejemplo, tipo de tablero, losa, sección cajón.., al canto del tablero o la anchura del mismo; las variables ambientales se refiere a los datos de tipo meteorológico, como por ejemplo la temperatura existente en el ambiente, oscilación de la temperatura a lo largo del día, valores máximos y mínimos de la misma, datos de la radiación solar incidente, de la emisión de radiación térmica del propio puente, datos del viento y su velocidad, y fundamentalmente de la distribución en el tiempo de todas estas variables.

Para la resolución de la ecuación de transmisión de calor con flujo unidimensional, se ha creado el programa BRIDGE cuyas características se pueden contemplar en el Capítulo 9.1 de la presente tesis.

Los datos de entrada del programa BRIDGE son las referentes a las variables geométricas del puente y meteorológicas del ambiente en el día considerado, y la salida de resultados puede ser de dos tipos: bien un listado numérico de temperaturas y tensiones o bien un dibujo en plotter de las curvas de la temperatura cada hora.

Con los dos tipos de resultados se ha efectuado el estudio paramétrico que se indica a continuación:

En el Capítulo 8.1 se describe el modelo matemático para la resolución y las hipótesis previas de cálculo.

7.1.2. ESTUDIO DEL ESTADO TERMICO DE DIVERSOS TIPOS DE TABLERO

En el Capítulo 6 de la presente tesis se ha efectuado una clasificación de los tableros de puente a efectos térmicos, en puentes tipo losa de diferentes espesores, puentes de sección cajón monocelular, puentes de tablero con aligeramientos y puentes de vigas.

En este mismo Capítulo (Apartado 7.1.1) se considera la ecuación del flujo de calor unidimensional que se puede aplicar en los casos en que efectivamente se produzca este tipo de flujo de calor. Dentro de la clasificación de tableros de puente propuesta anteriormente puede considerarse un flujo de calor unidimensional en el caso de puentes de tipo losa y del tipo sección cajón monocelular, si se considera en este último caso que el calor pasa del forjado superior al inferior a través del aire, ya que el flujo vertical a través de las almas de la sección cajón es despreciable, como se demostrará en el Capítulo 7.2.

Se ha tratado por separado el caso de puentes con table ro tipo losa y los puentes de sección cajón. En ambos casos se hace el estudio para condiciones extremas de día caluroso en verano y noche fría en invierno.

7.1.2.1. PUNTES LOSA

Se considera primeramente el caso de puentes tipo losa, y en ellos se estudiará la influencia de la temperatura inicial del puente.

En las figuras 7.1 a 7.4 se puede observar el diagrama de temperaturas para cada hora en una losa de 0,80 m de espesor empezando a las 8,00 horas hasta las 23,00 horas. En todos los casos la temperatura inicial es uniforme en el puente a los 8,00 horas, ya que las mediciones efectuadas hasta la fecha indican que esa es la hora de menor gradiente térmico en un día caluroso. Este punto también se demuestra en esta tesis, bien a través del análisis de las gráficas de este capítulo, o específicamente en el capítulo 7.2. En cada caso la temperatura uniforme de comienzo varía cada 5°C y sin embargo la máxima temperatura alcanzada y la hora a la cual la alcanza es igual en todos los casos.

De estas gráficas se deduce que ya no solamente no importa la temperatura uniforme del puente para el máximo va-

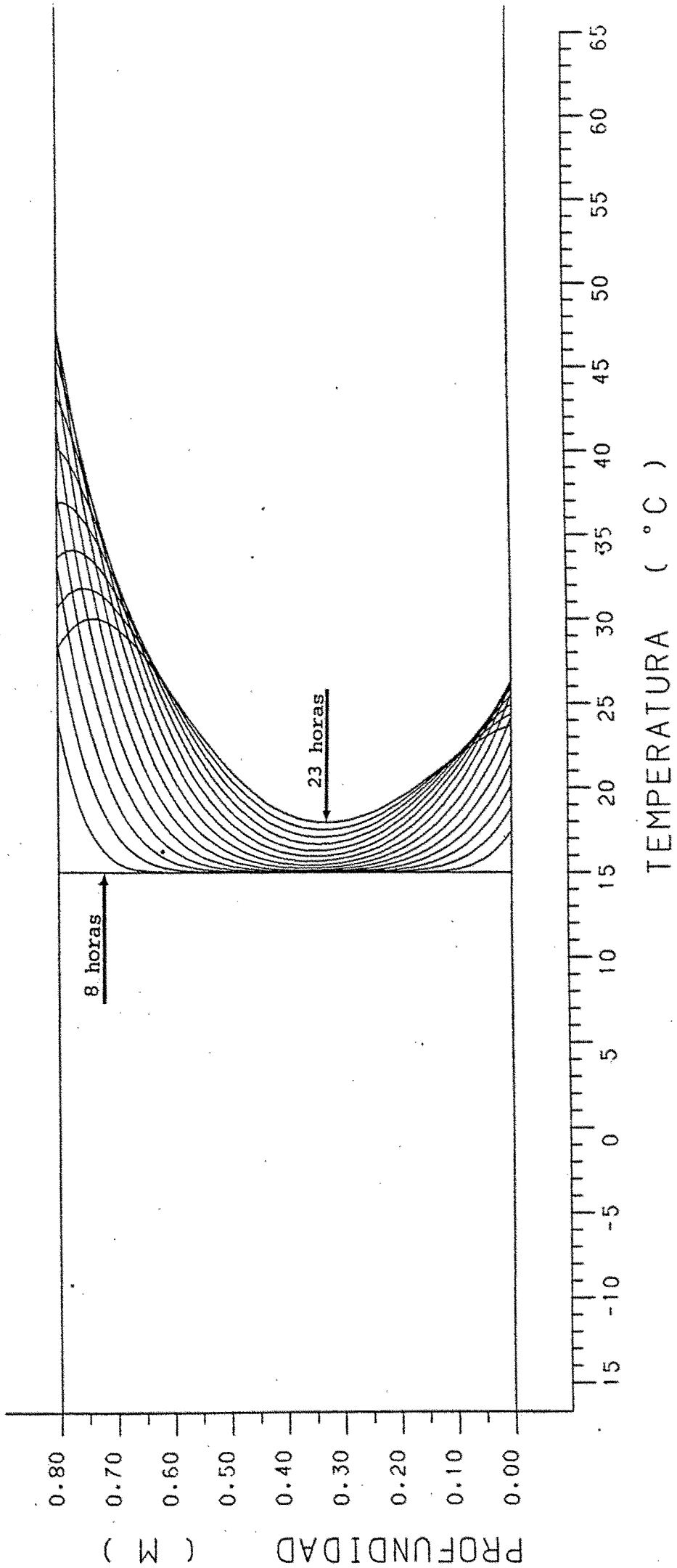


Figura 7.1

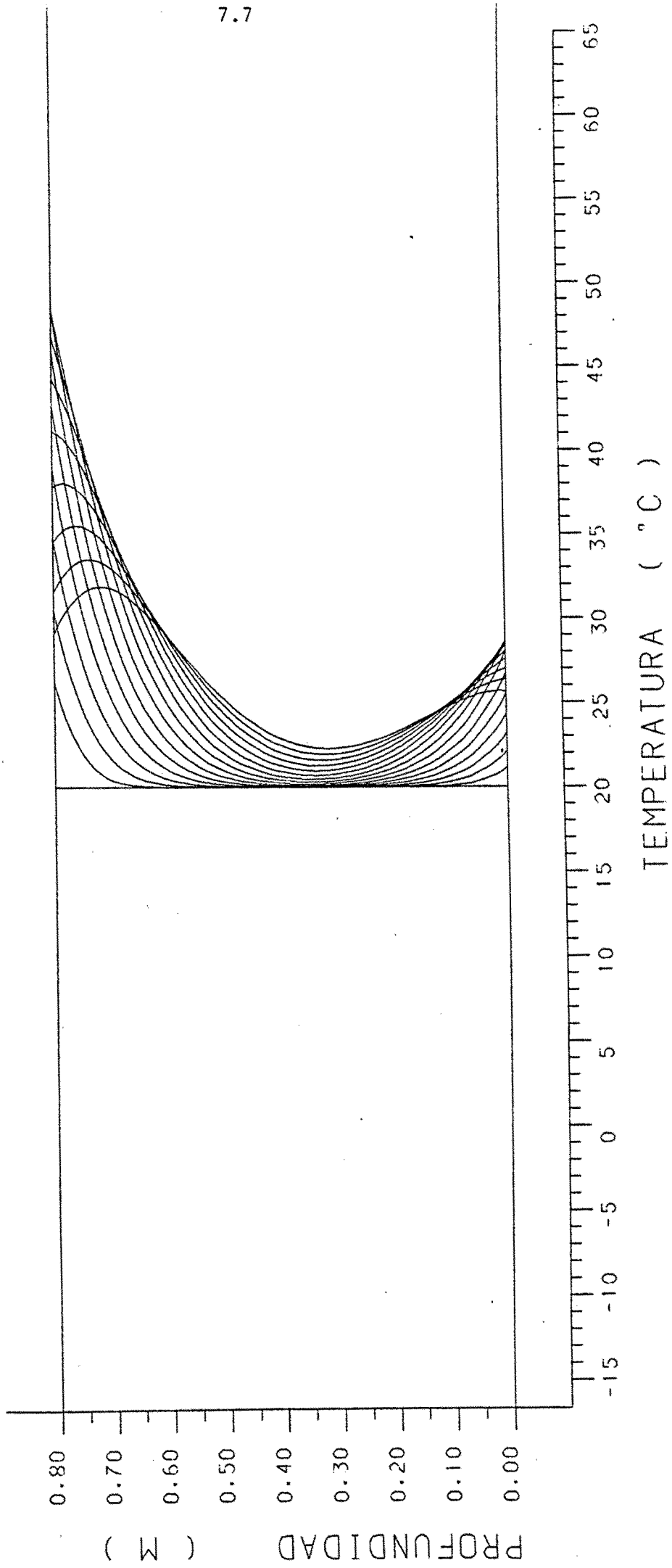


Figura 7.2

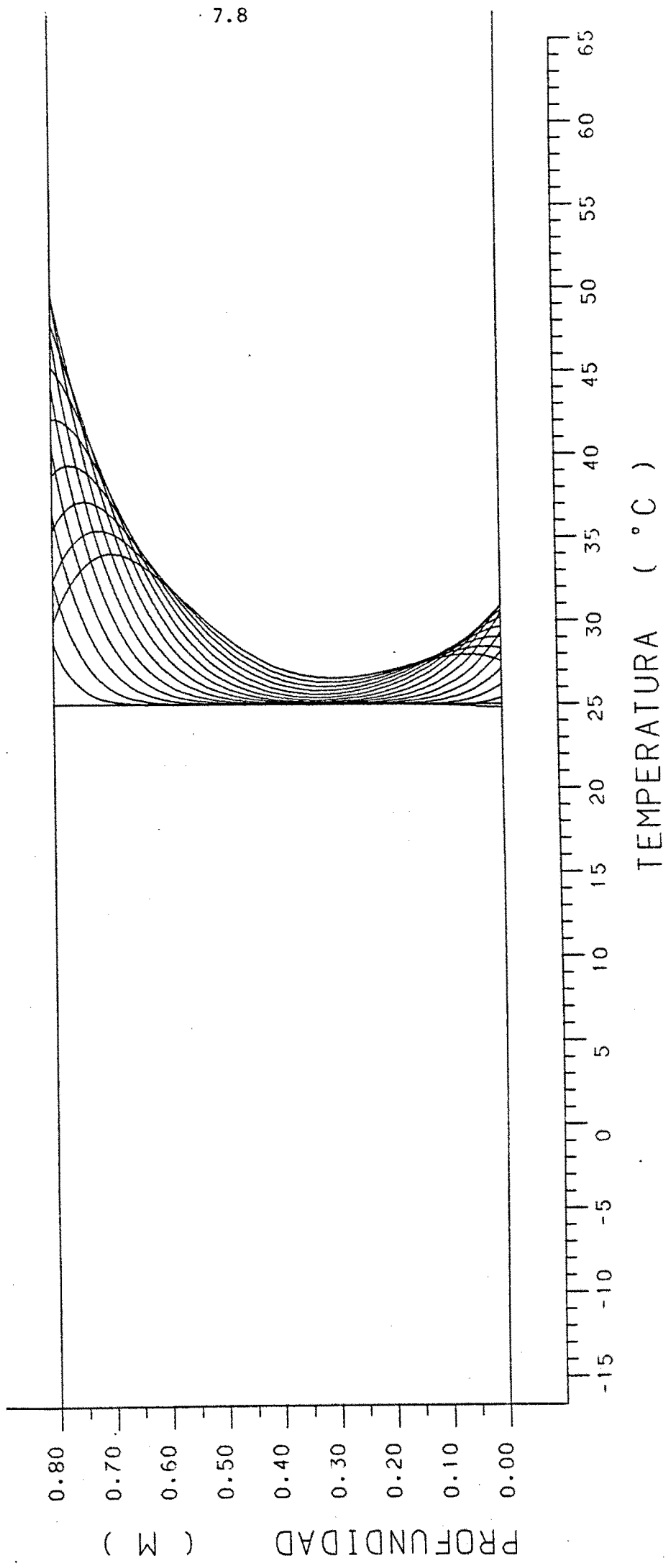


Figura 7.3

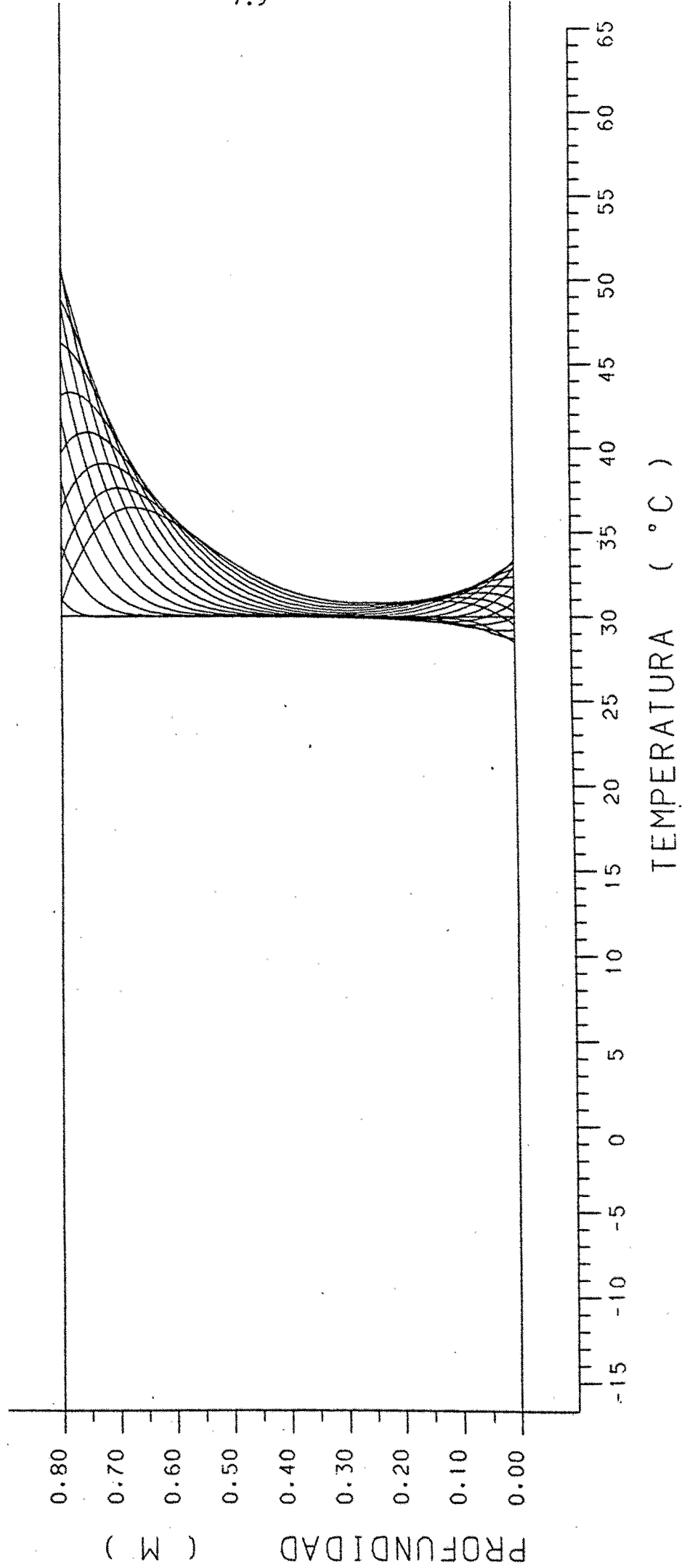


Figura 7.4

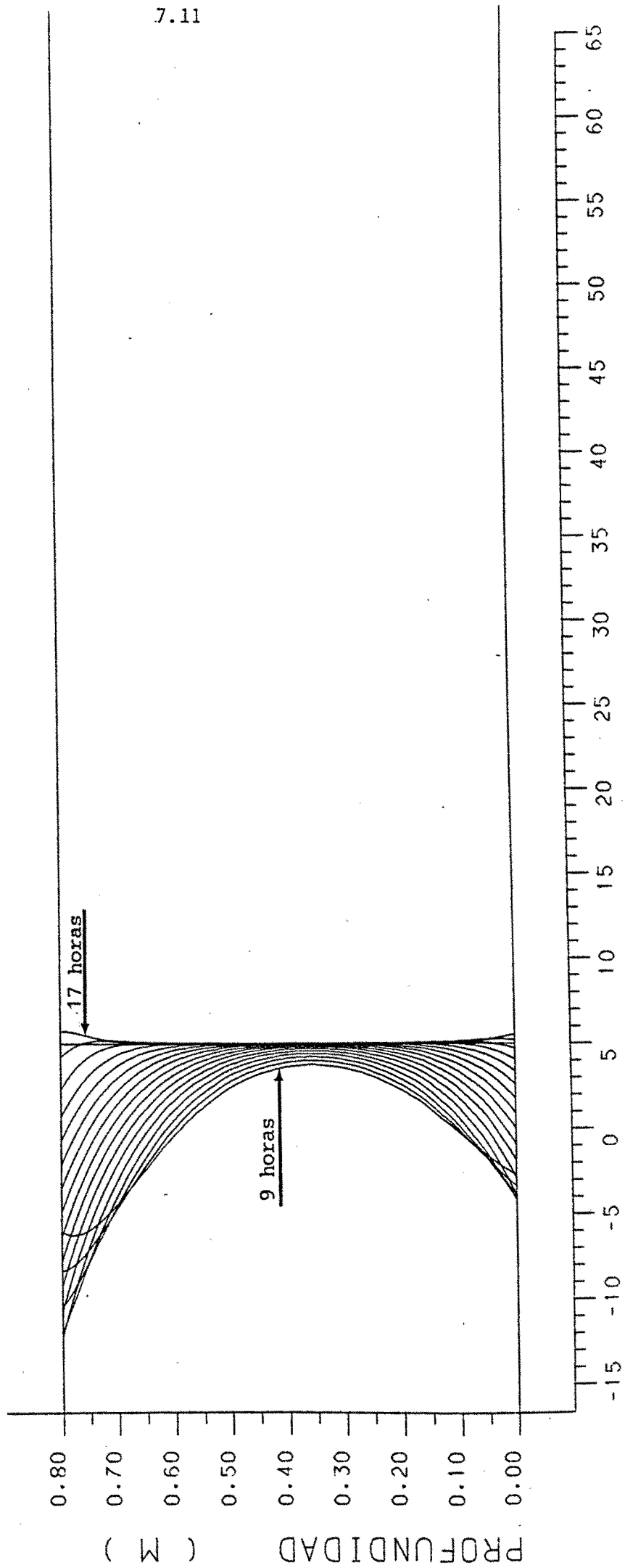
lor alcanzado si no que además esa temperatura inicial podría tener cualquier distribución lógica, que sin embargo, el resultado de la máxima temperatura alcanzada sería el mismo.

Respecto a la temperatura eficaz alcanzada en el puente en cada caso, evidentemente es diferente puesto que la temperatura eficaz de la que se parte también es diferente y como se demostrará más adelante la temperatura eficaz está ligada con la energía recibida y depende de la temperatura efectiva inicial.

En las figuras 7.5 a 7.7 se hace un estudio similar con un puente de las mismas características (losa de 0,80 metros de espesor) para una noche fría de invierno. Se considera el dato inicial de temperatura uniforme en el puente a las 16,00 horas y se dibujan las curvas de temperatura a diferentes horas hasta las 9,00 horas del día siguiente.

Se considera tres temperaturas iniciales del puente -5°C , 0°C y $+5^{\circ}\text{C}$ y exactamente igual que en el caso anterior las temperaturas mínimas alcanzadas son iguales en ambos casos, independientemente de la temperatura inicial del puente, no obteniéndose un mismo valor de la temperatura eficaz en cada caso, como ya se preveía por el análisis anterior.

En ambos casos de cálculo diurno y nocturno, faltaría de considerar los casos de hipótesis inicial con igual tem-



TEMPERATURA (° C)

Figura 7.5

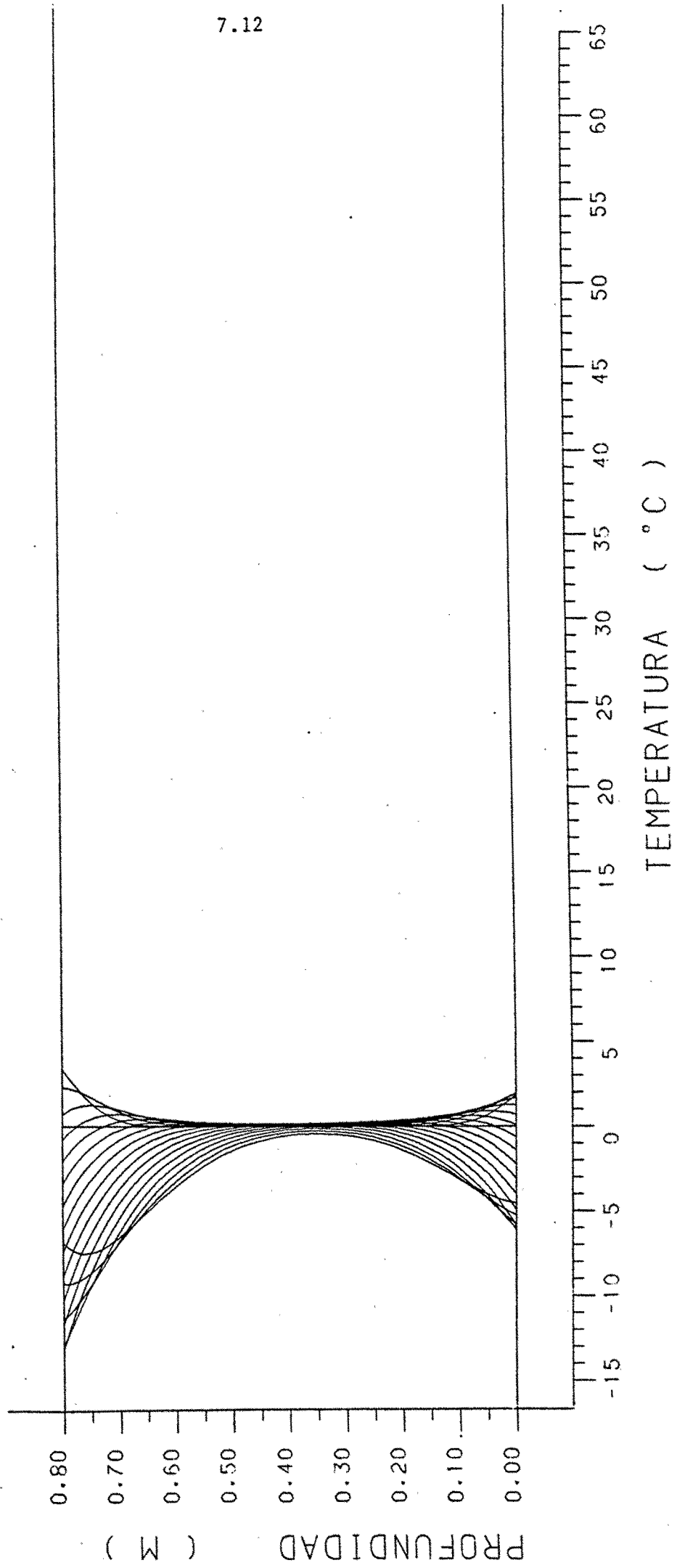


Figura 7.6

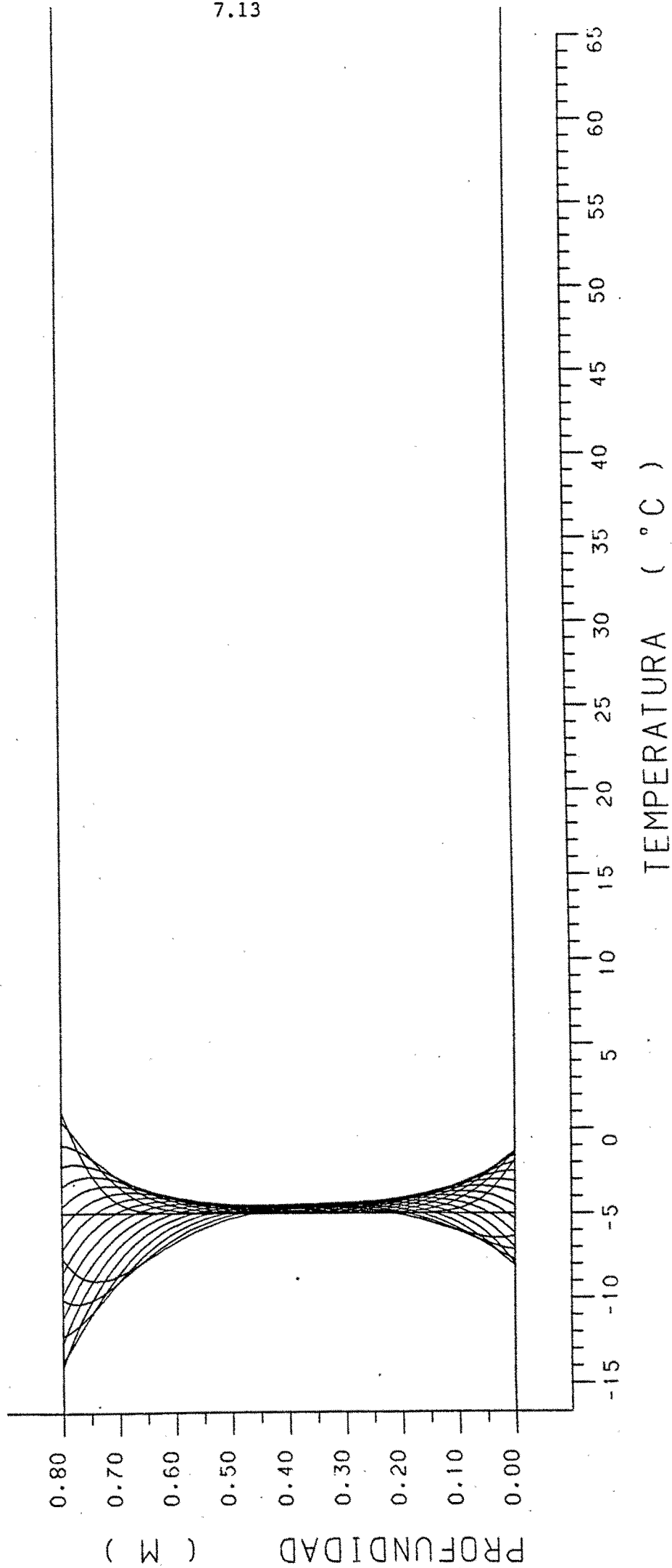


Figura 7.7

peratura efectiva inicial, pero con distribuciones diferentes a la uniforme ya considerada con el fin de comprobar numéricamente la independencia del tipo de distribución inicial con respecto a las temperaturas máximas y mínimas, y con respecto a la temperatura eficaz en cada instante.

La dependencia de la temperatura eficaz en cada instante depende de la temperatura eficaz inicial según la fórmula matemática (7.7) del capítulo 7.1.5. Respecto a las condiciones iniciales deberán ser siempre compatibles y deducibles de unas condiciones de contorno previas definidas en el capítulo 4.

En el capítulo 7.2 en que se efectúa el cálculo para un día completo de 24 horas, se demostrará que las 8,00 horas es adecuada para el comienzo del cálculo, suponiendo además temperatura uniforme a esa hora.

El segundo estudio efectuado con los puentes tipo losa se refiere al comportamiento de losas de diferentes espesores con las mismas condiciones climatológicas.

En las figuras 7.8 a 7.11 se representan los diagramas de temperaturas en un día caluroso de verano, para losas de espesor 1,00 m, 0,80 m, 0,60 m y 0,40 m. En todos los casos la condición inicial es temperatura uniforme a las 8,00 h.; y las condiciones de contorno ambientales son iguales. La

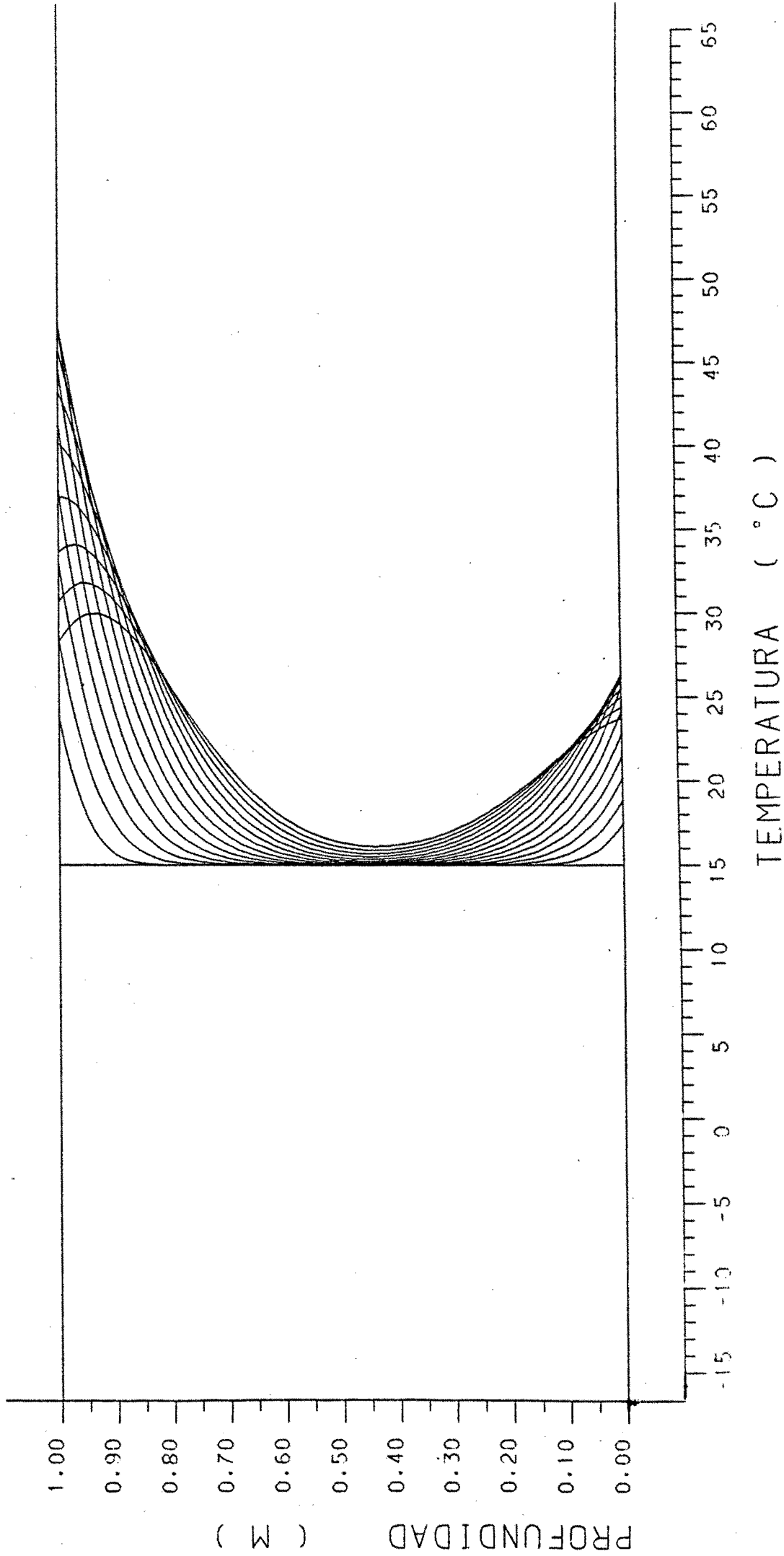


Figura 7.8

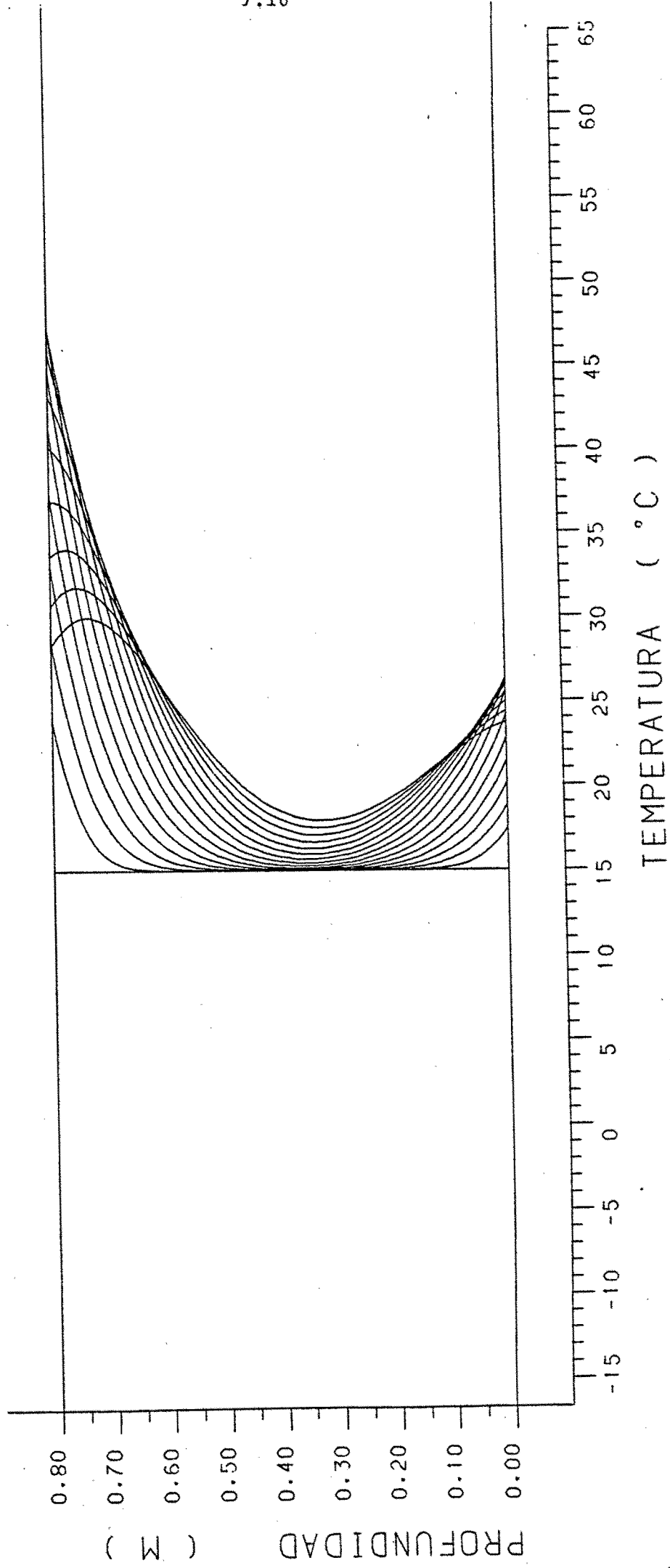
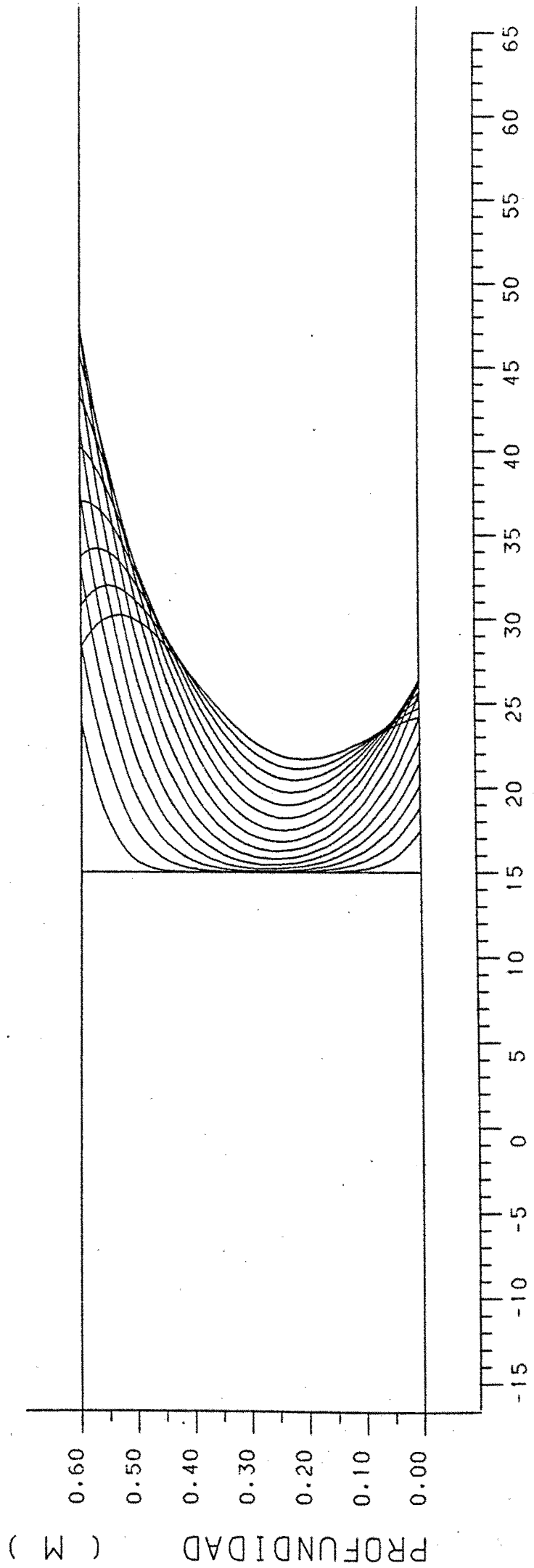


Figura 7.9



TEMPERATURA (° C)

Figura 7.10

PROFUNDIDAD (M)

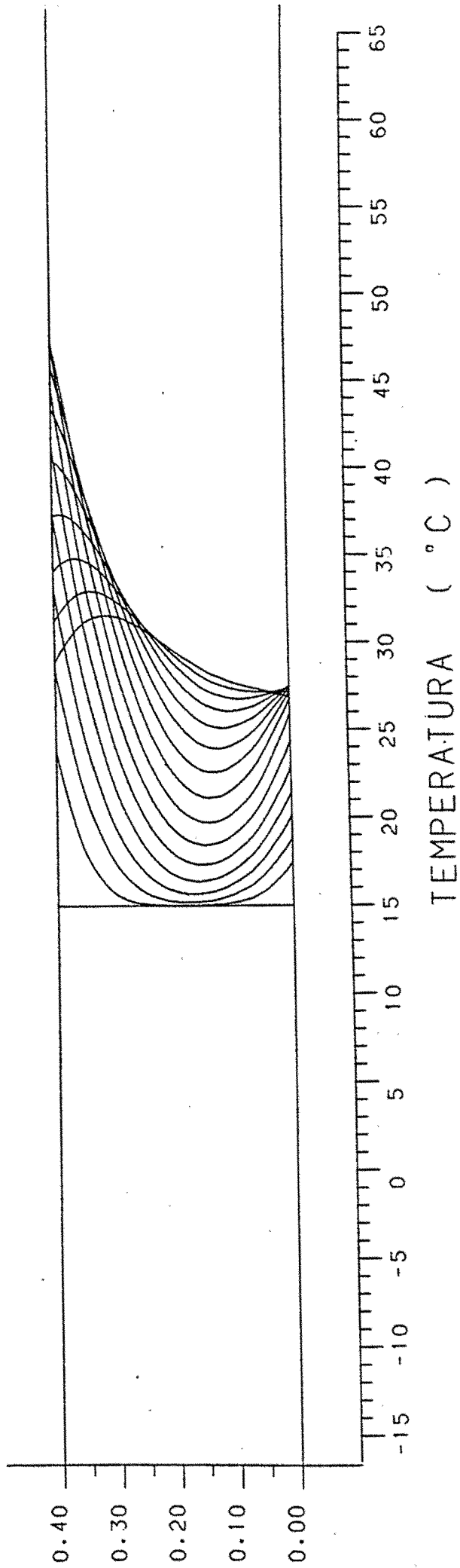


Figura 7.11

última curva representada corresponde a las 23 horas.

La temperatura máxima alcanzada en todos los casos es de 47°C y se produce hacia las 15,00 horas.

La máxima temperatura en el intradós o fondo del tablero en todos los casos oscila entre 27°C y 28°C .

La diferencia en cada caso existe solamente en los puntos del interior del tablero debido a la diferente inercia térmica de cada sección.

El cálculo efectuado para una noche fría de invierno, deduce las mismas conclusiones. En las figuras 7.12 a 7.15 se representan los diagramas de temperaturas entre las 16 horas en que se considera temperatura uniforme de 0°C y las 9,00 horas del día siguiente. Las condiciones ambientales en todos los casos son iguales.

Las temperaturas mínimas en todos los casos se producen en la zona superior y oscilan alrededor de -13°C . En la zona inferior la temperatura resultará próxima a -6°C .

La diferencia, al igual que en el caso de día caluroso, se produce solamente en el centro del puente debido a la inercia térmica de cada caso. Esto implicará como es lógico que la temperatura eficaz del puente en cada caso sea diferente.

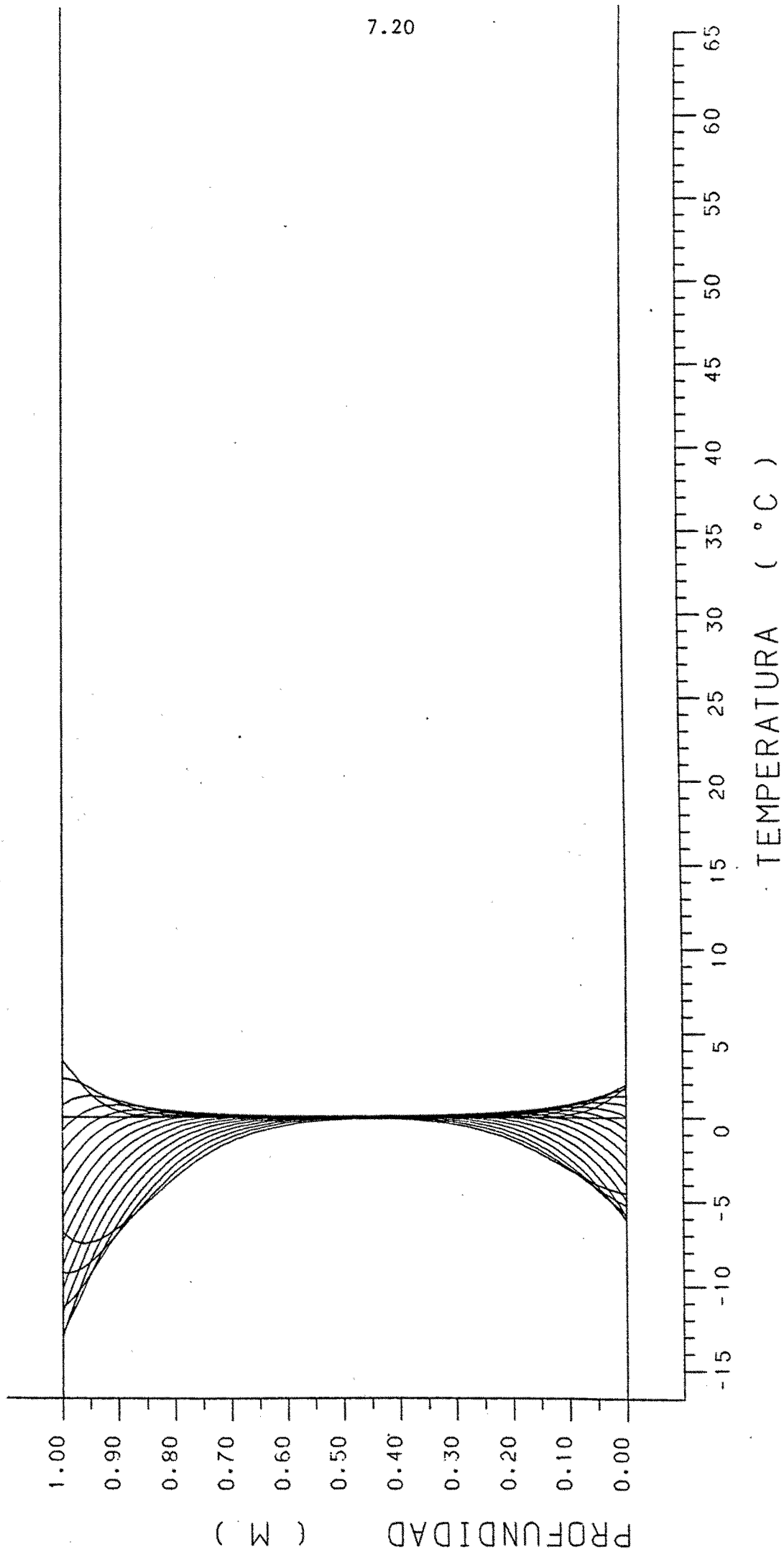


Figura 7.12

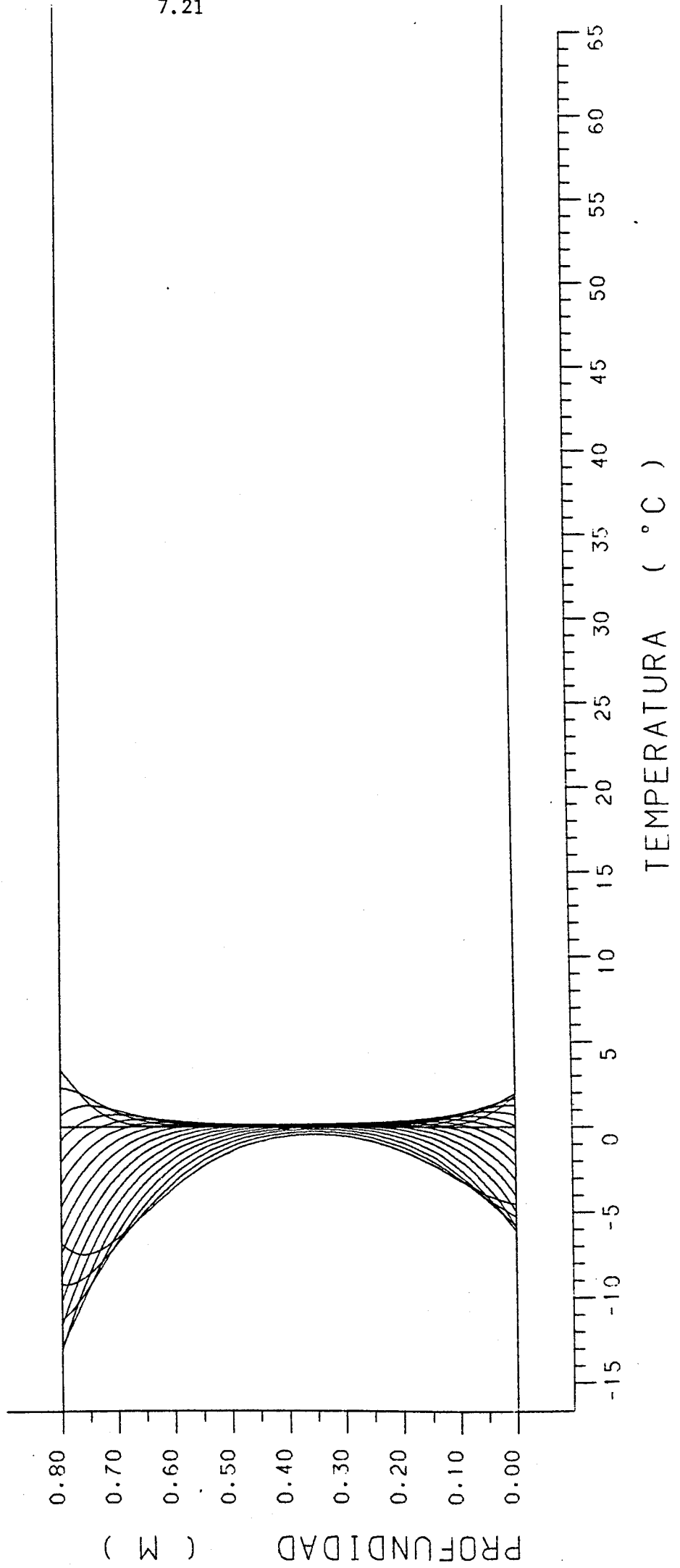


Figura 7/13

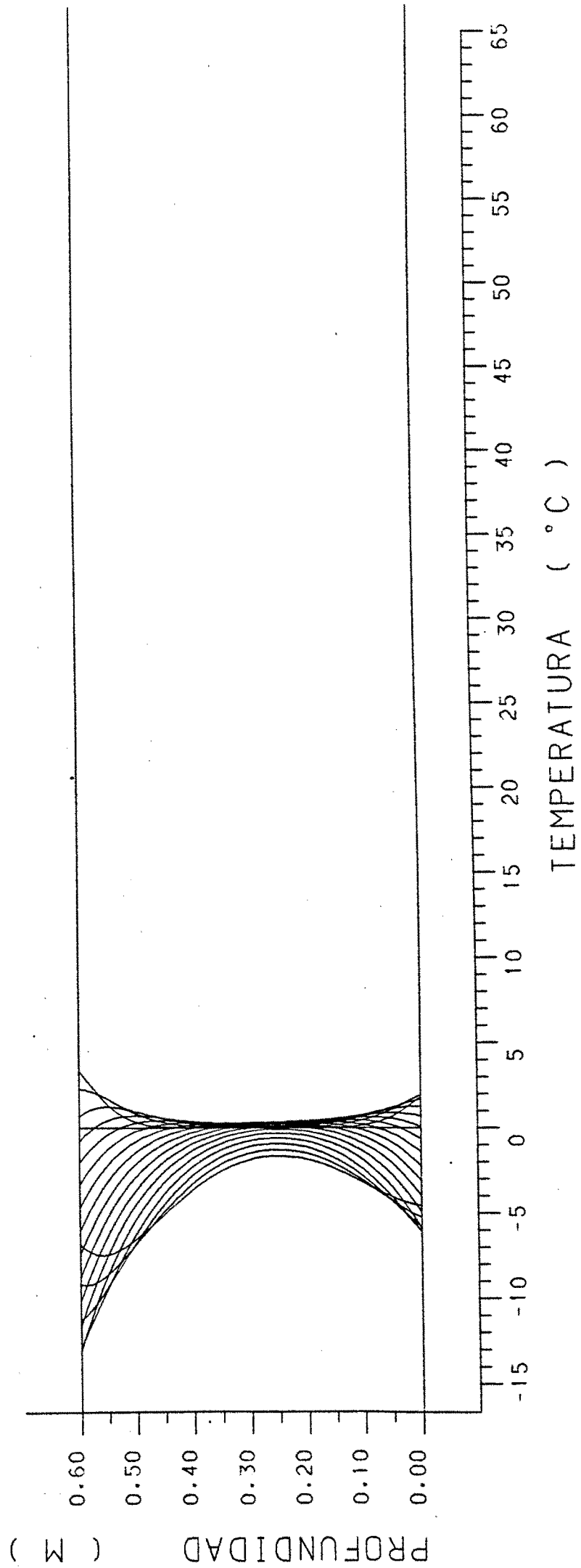


Figura 7.14

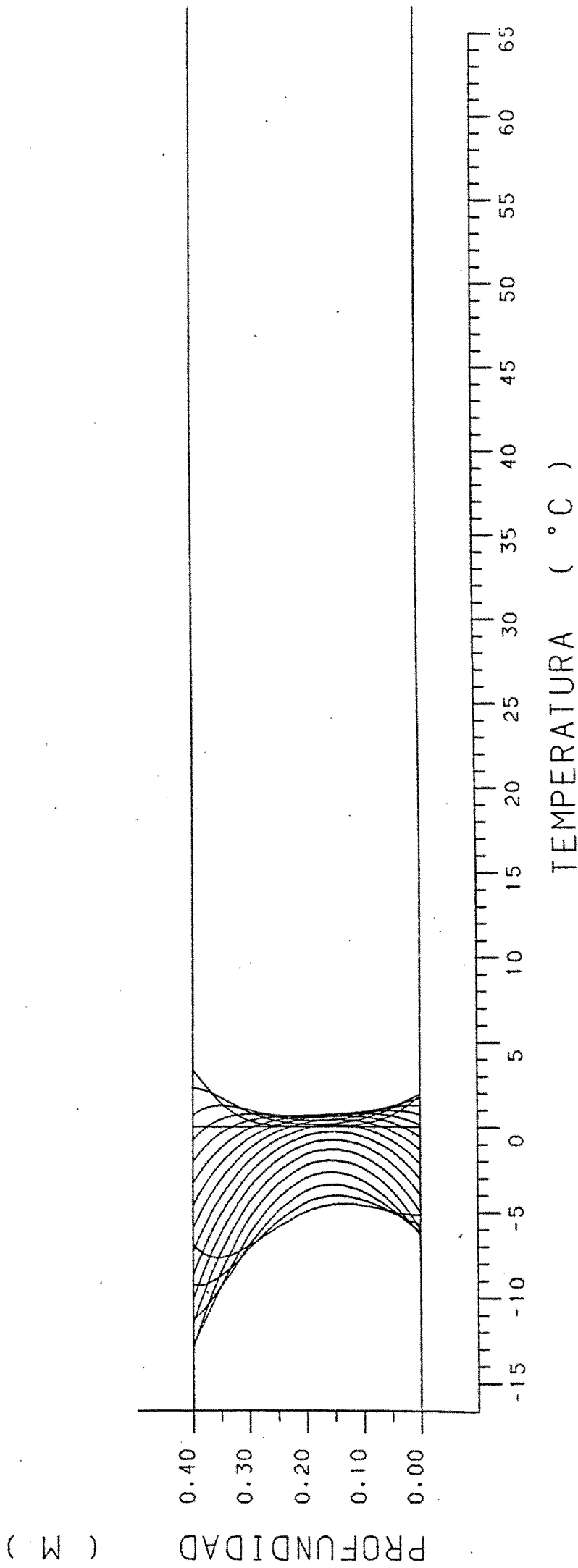


Figura 7.15

7.1.2.1. PUENTE DE SECCION CAJON

En el caso de puentes con tablero de sección cajón se hacen dos estudios diferentes entre sí. En primer lugar se considera un puente con geometría fija de 25 cm de forjado superior y 20 cm de forjado inferior y se estudia la influencia de la temperatura eficaz inicial para los dos casos ya considerados de día caluroso y noche fría.

El caso de día caluroso de verano está representado en las figuras 7.16 a 7.18. Están dibujados los casos de temperatura inicial uniforme 15°C, 20°C y 25°C, el comienzo del cálculo se supone las 8 horas y el fin a las 23'00 horas. En todos los casos la temperatura máxima se produce en la parte superior del forjado superior, con un valor próximo de 47°C entre las 14 horas y las 15 horas, que coincide con los casos de puente tipo losa para las mismas condiciones ambientales.

Un dato significativo de los puentes con sección cajón diferencia de temperaturas existente, entre la parte superior e inferior del hueco de la sección, o el fondo del forjado superior y la parte superior del forjado inferior. En las figuras se observa este desfase entre las temperaturas que puede llegar a un valor máximo de aproximadamente 5°C, y que concuerda con los valores experimentales (1).

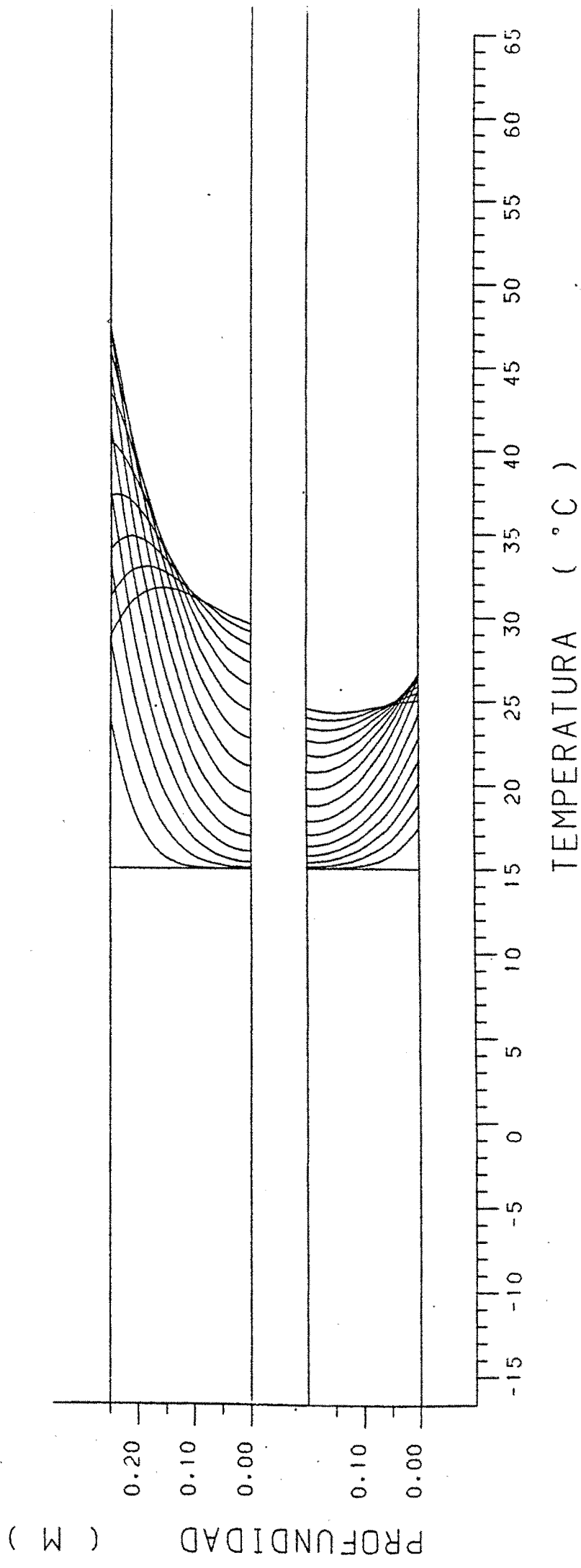


Figura 7.16

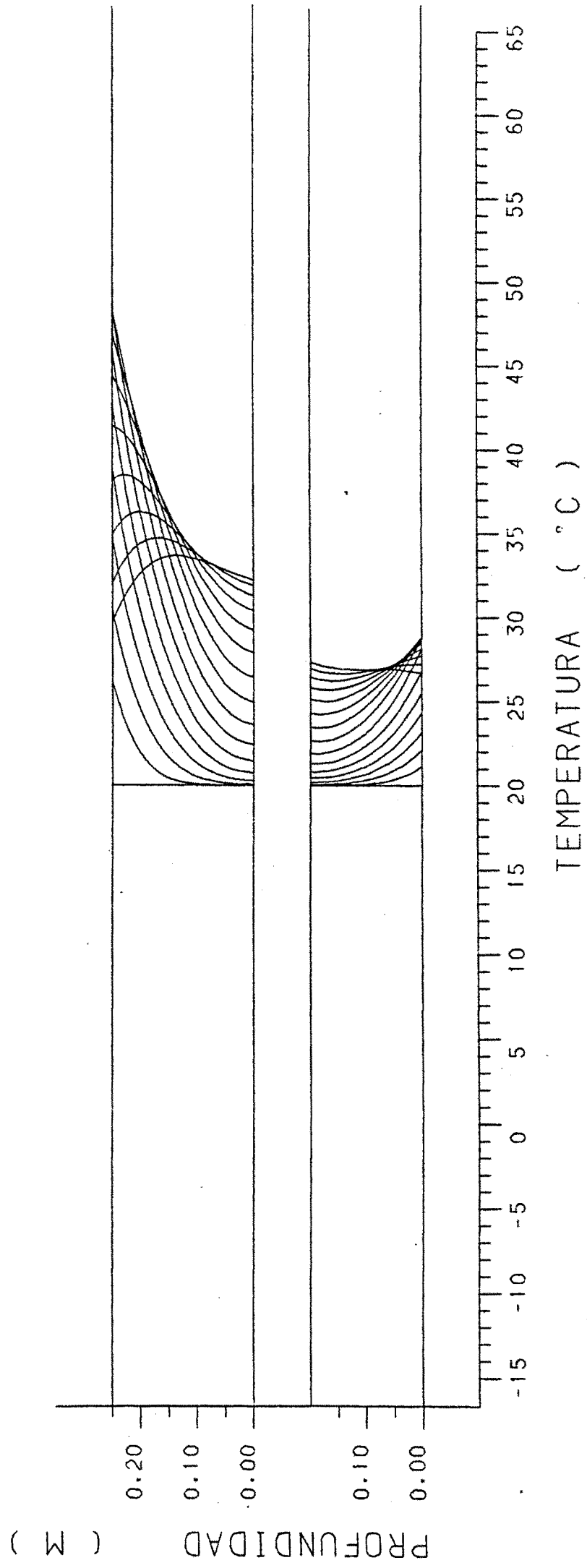


Figura 7.17

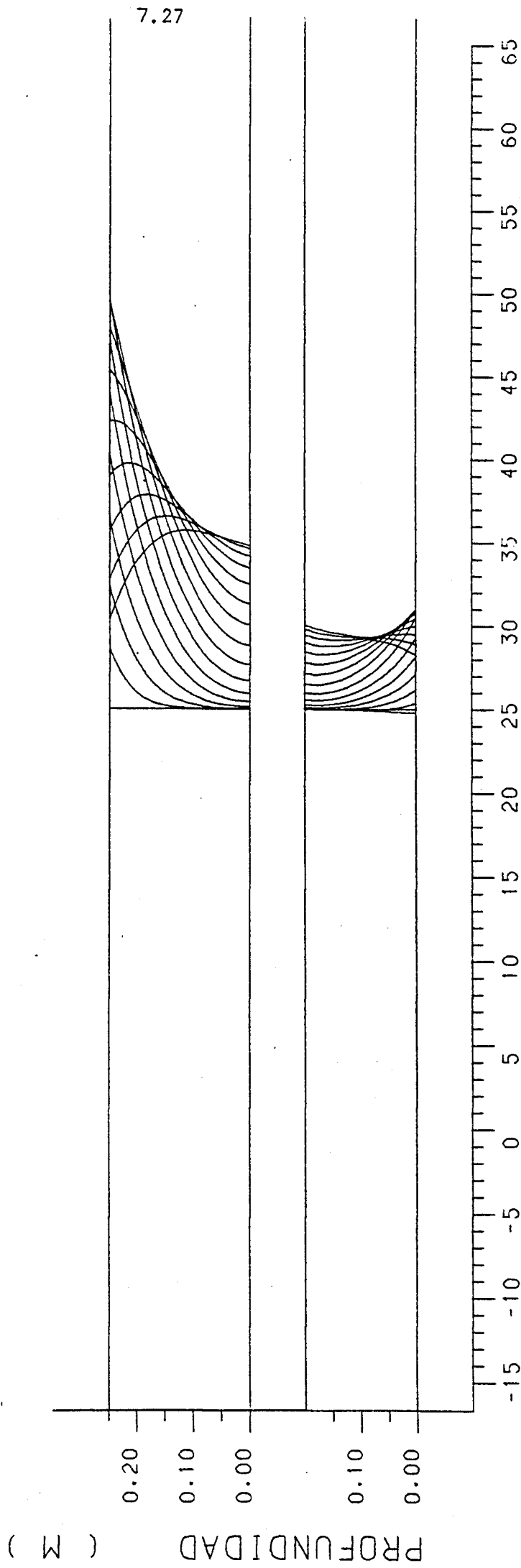


Figura 7.18

Debido a la forma como se ha definido el coeficiente de convección entre las dos superficies (capítulo 1.1.3) se podría deducir que el aire tiene una temperatura aproximadamente intermedia entre la parte superior e inferior del hueco a la misma hora.

Para el caso de noche fría de invierno, (figura 7.19 a 7.21) las conclusiones son iguales. Se ha supuesto temperatura uniforme a las 16,00 horas de valores -5°C , 0°C y $+5^{\circ}\text{C}$, y las temperaturas mínimas en los tres casos son iguales, variando únicamente la temperatura mínima alcanzada en el fondo del forjado inferior. En el hueco de la sección cajón apenas hay una diferencia máxima de 2°C entre la parte superior y la inferior, ya que la noche produce menos oscilación de temperaturas que el día, como se puede comprobar en las figuras.

El segundo estudio efectuado con los puentes de tipo sección cajón, se refiere a la variación de geometría de la sección cajón referida al espesor del forjado, como suele ser habitual, para poder tener más área de compresión en los apoyos; el espesor del forjado superior se considera de 0,20 ms y el inferior oscila entre 0,20 y 0,40 ms.

El resultado se observa en las figuras 7.22 a 7.27. Las tres primeras figuras se refieren a un cálculo diurno en verano del tablero y las tres restantes a un caso de cálculo nocturno en invierno.

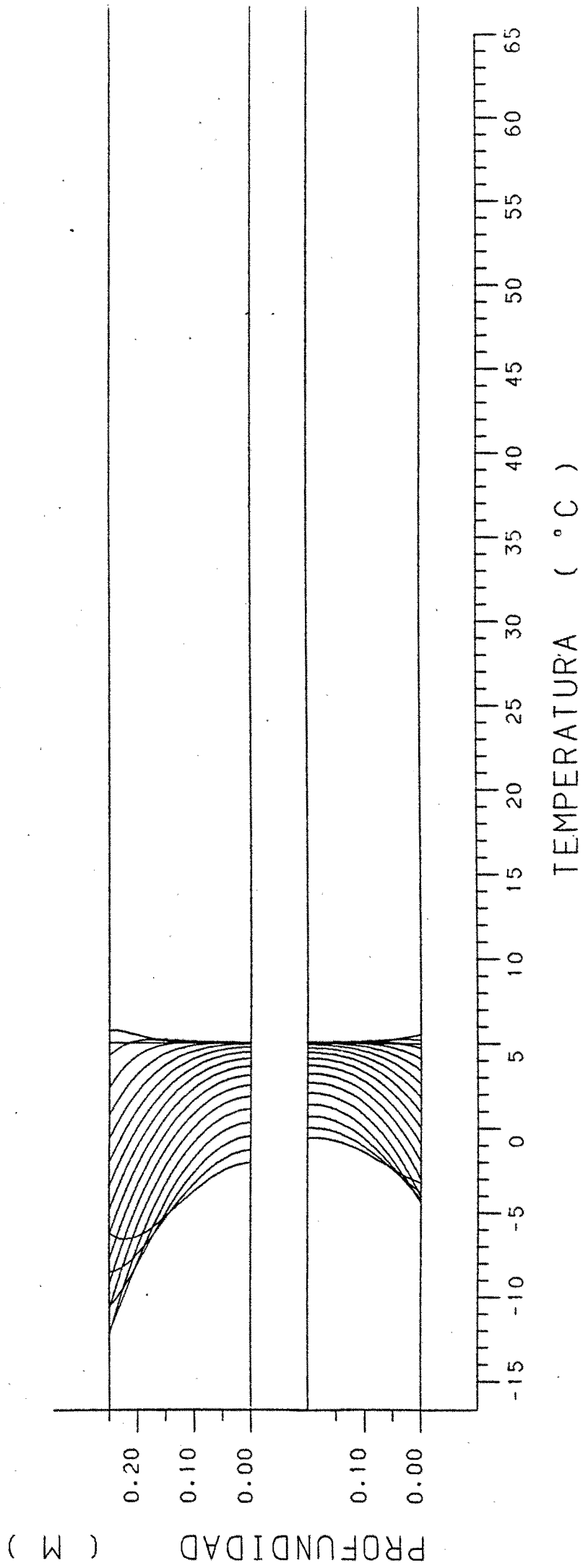
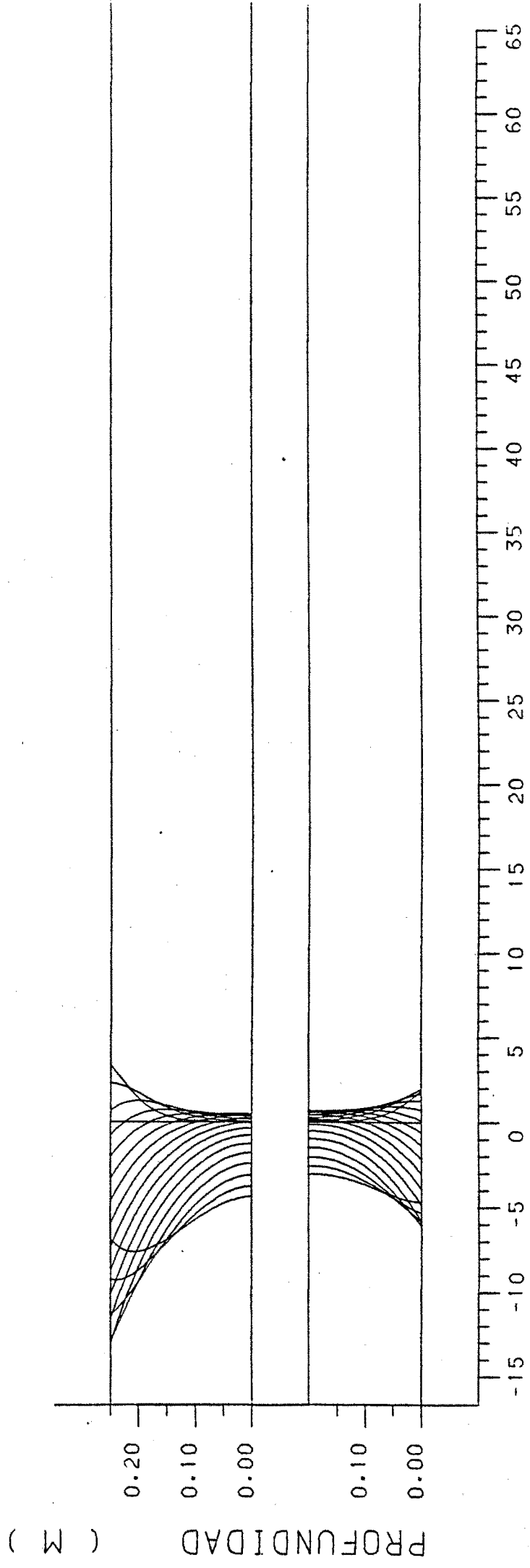


Figura 7.19



TEMPERATURA (° C)

Figura 7.20

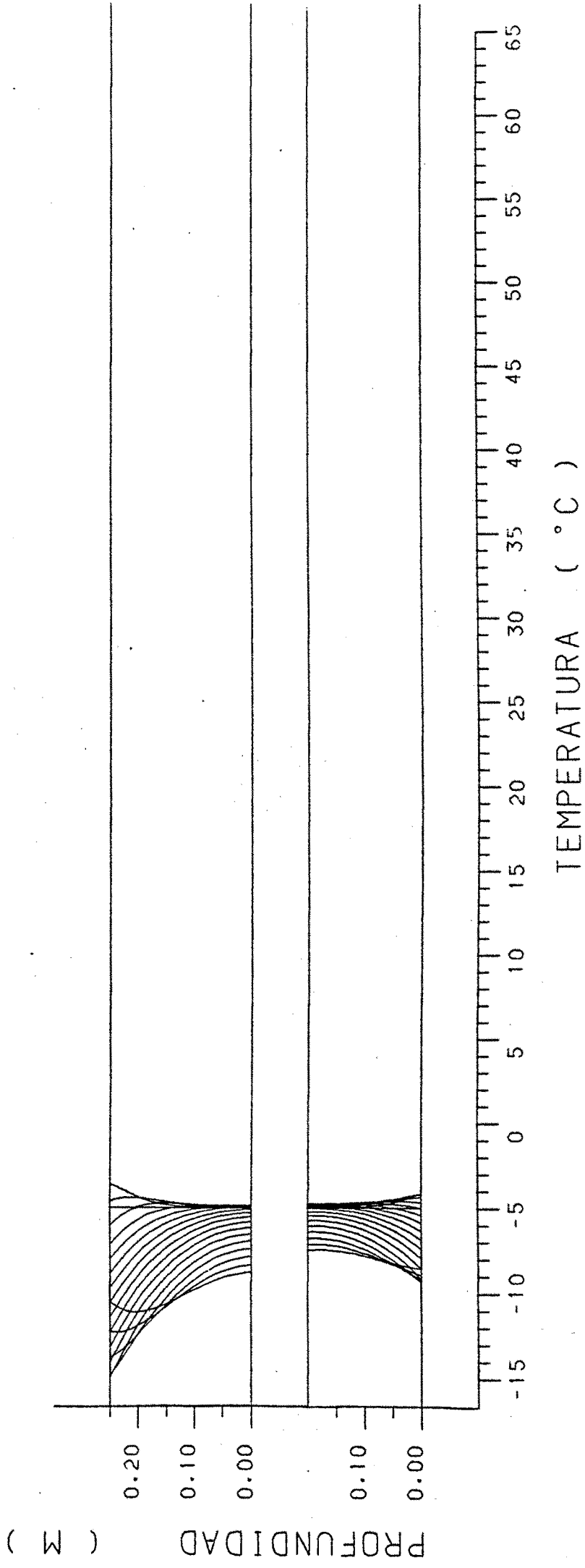


Figura 7.21

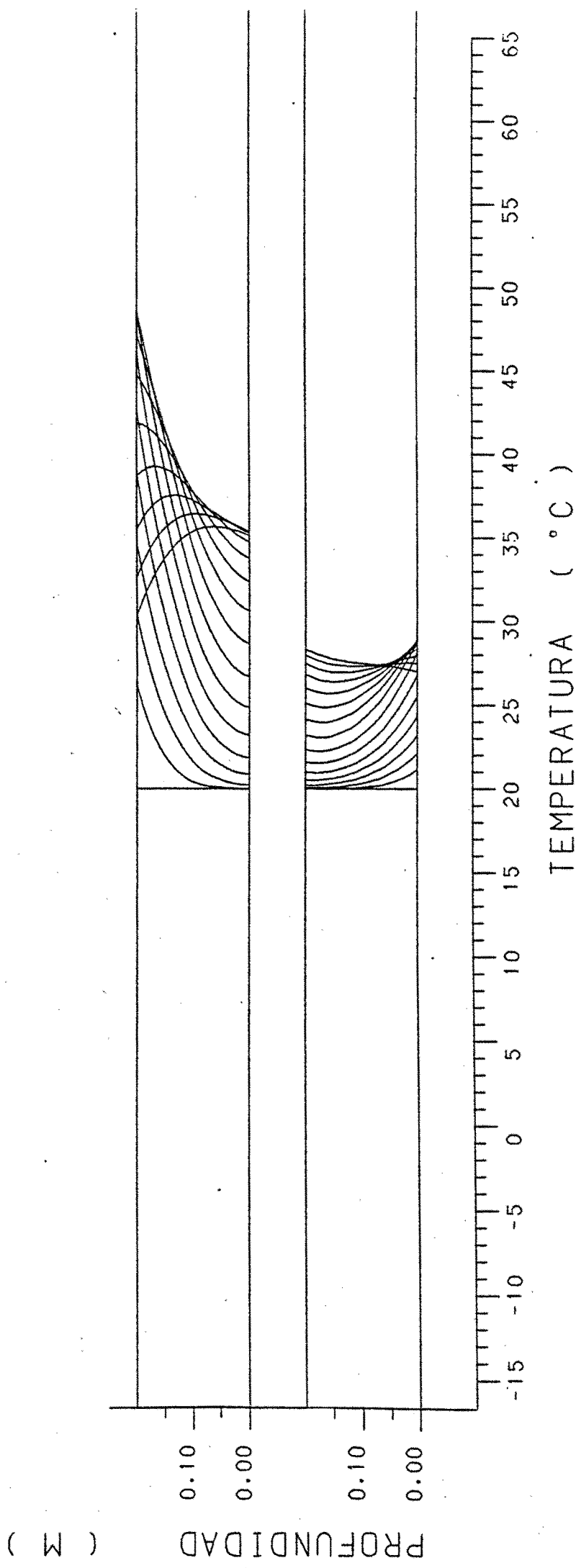


Figura 7.22

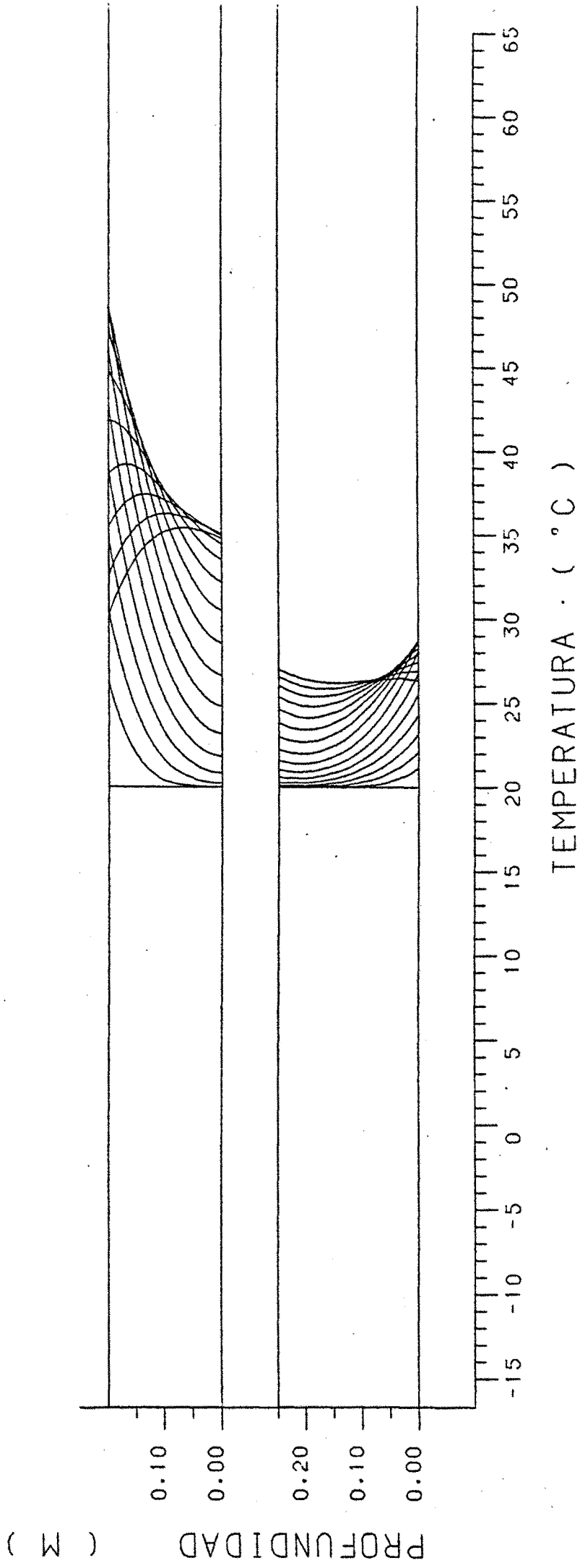
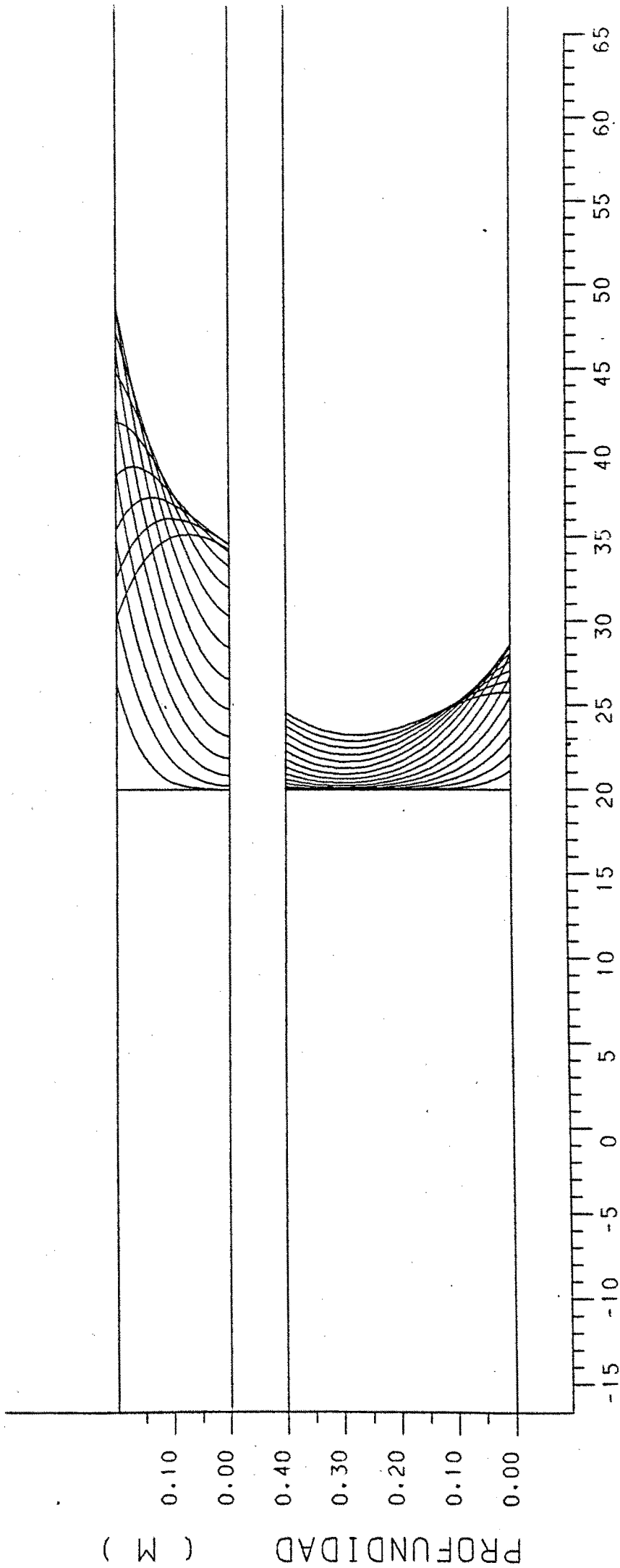


Figura 7.23



TEMPERATURA (° C)

Figura 7.24

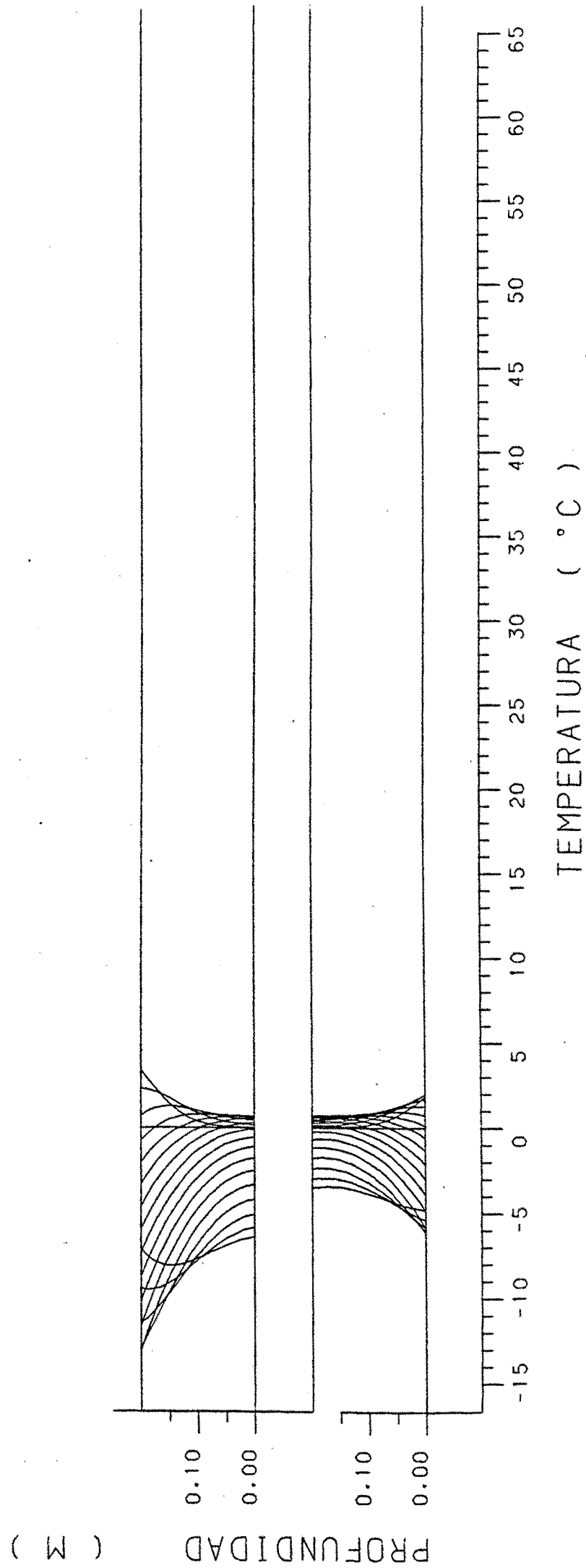


Figura 7.25

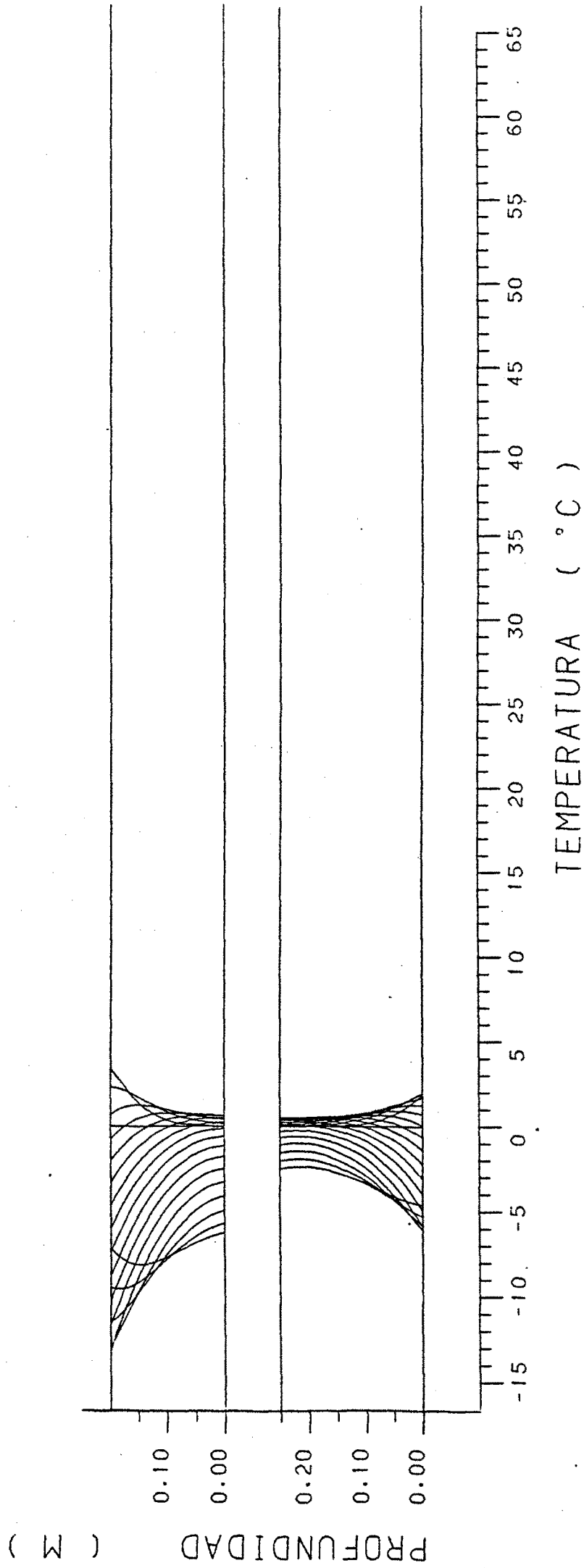


Figura 7.26

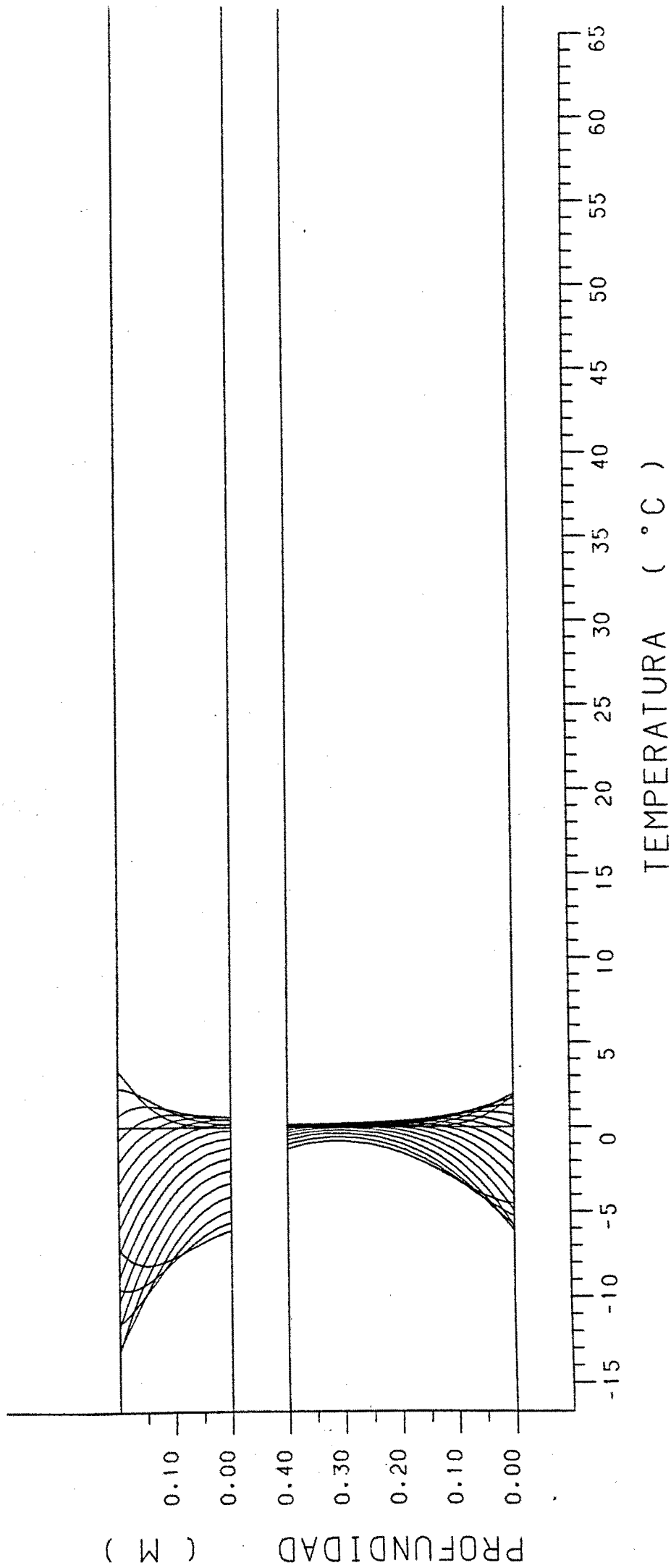


Figura 7.27

La conclusión que se desprende de las citadas figuras es que el forjado superior, que es el que recibe (o desprende) la mayor parte de la energía calorífica se comporta térmicamente de forma casi independiente del forjado inferior, mostrando un fuerte gradiente de temperaturas, mientras que el forjado inferior que recibe calor por ambas partes mediante el mismo mecanismo de convección sufre una variación de temperatura casi constante, por lo que se podría considerar una distribución de temperaturas de cálculo, diferente para ambos forjados pero relacionados entre sí, por ejemplo una distribución trapezoidal en el forjado superior y una distribución constante del forjado inferior. (Figura 7.28).

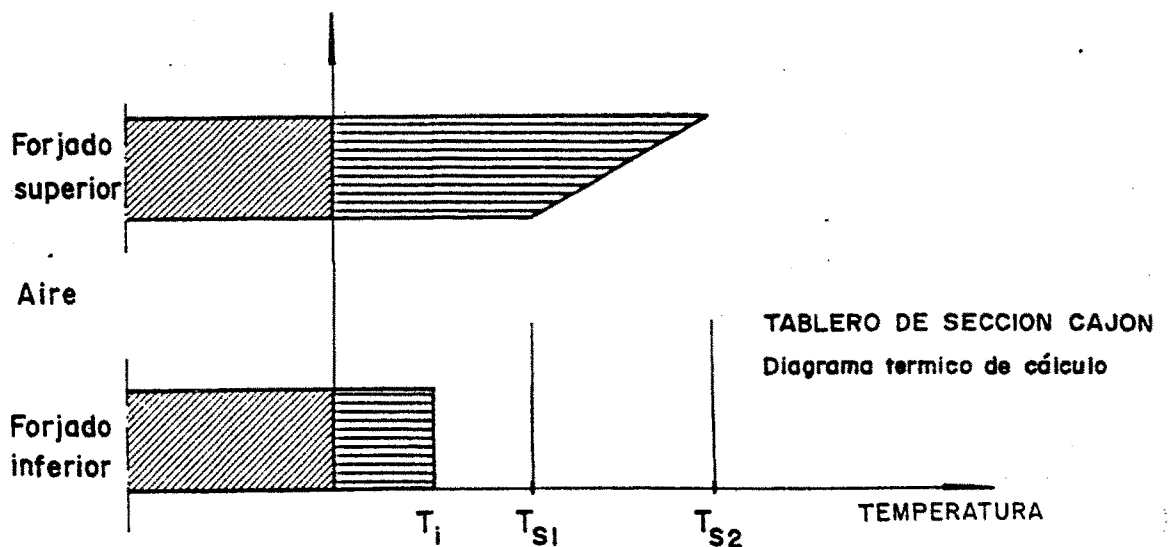


Figura 7.28.

Las temperaturas T_i , T_{s1} y T_{s2} vendrían definidas en cada caso por las condiciones ambientales de contorno (Capítulo 4) y dependen por tanto, de la localización geográfica del tablero.

7.1.3. INFLUENCIA DE LA CONDUCTIVIDAD DEL HORMIGÓN EN EL ESTADO TÉRMICO DE UN PUENTE

En el Capítulo 1.1.1. referido a la conducción de calor se hace referencia al valor de la conductividad térmica del hormigón y de las variables de que puede depender dicho valor.

En él se deduce que los valores habituales del hormigón pueden corresponder a un intervalo entre 1,2 W/m.K y 1,7 W/m.K.

Se han efectuado diferentes pasadas en sus versiones de cálculo diurno y nocturno del programa BRIDGE, variando los valores de la conductividad térmica del hormigón entre 1,2 W/m.K y 1,7 W/m.K con intervalos de 0,1 W/m.K en un puente de tablero tipo losa de espesor 0,80 m con las mismas condiciones ambientales.

Las funciones que han caracterizado el estado térmico del puente en el cálculo diurno son, la temperatura máxima

alcanzada en el puente (a las 15 horas en todos los casos) a lo largo del día, y las temperaturas eficaces del puente a las 15 horas en que produce la máxima temperatura puntual en el tablero, y a las 21 horas en que se obtiene la máxima temperatura efectiva del puente. Los resultados se muestran en la figura 7.29.

En el estudio del cálculo diurno, se ha considerado una noche de frío extremo de invierno y se representan los valores de las temperaturas mínimas alcanzadas durante toda la noche en algún punto del puente (coincide en todos los casos a las 5 horas), y las temperaturas eficaces del puente a las 5 horas y a las 9 horas en que se produce el mínimo valor. Los resultados se muestran en la figura 7.30.

Del análisis de las figuras 7.29 y 7.30 se deduce que la variación del valor de la conductividad térmica del hormigón dentro del campo de valores normales, no influyen en el valor de la temperatura efectiva del puente, existiendo una variación de aproximadamente 2°C en los valores de las máximas y mínimas temperaturas registradas en un puente para valores extremos de las condiciones ambientales.

Por tanto, el valor de la conductividad térmica del hormigón tiene muy poca influencia en el estado térmico del puente, siempre que esté dentro del rango de valores habituales.

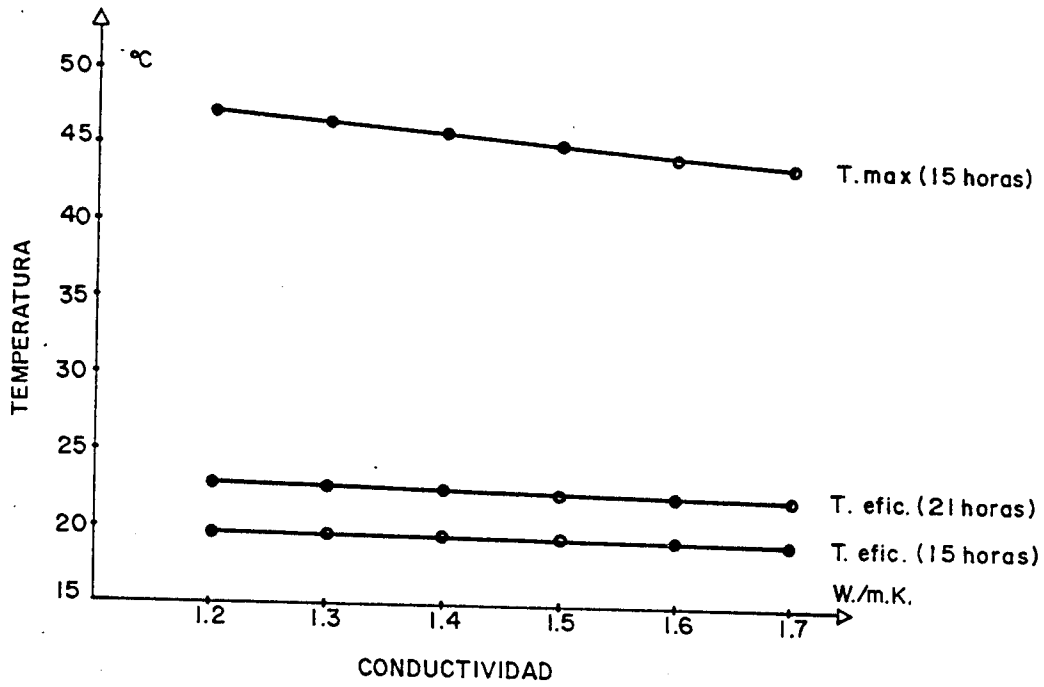


Figura 7.29

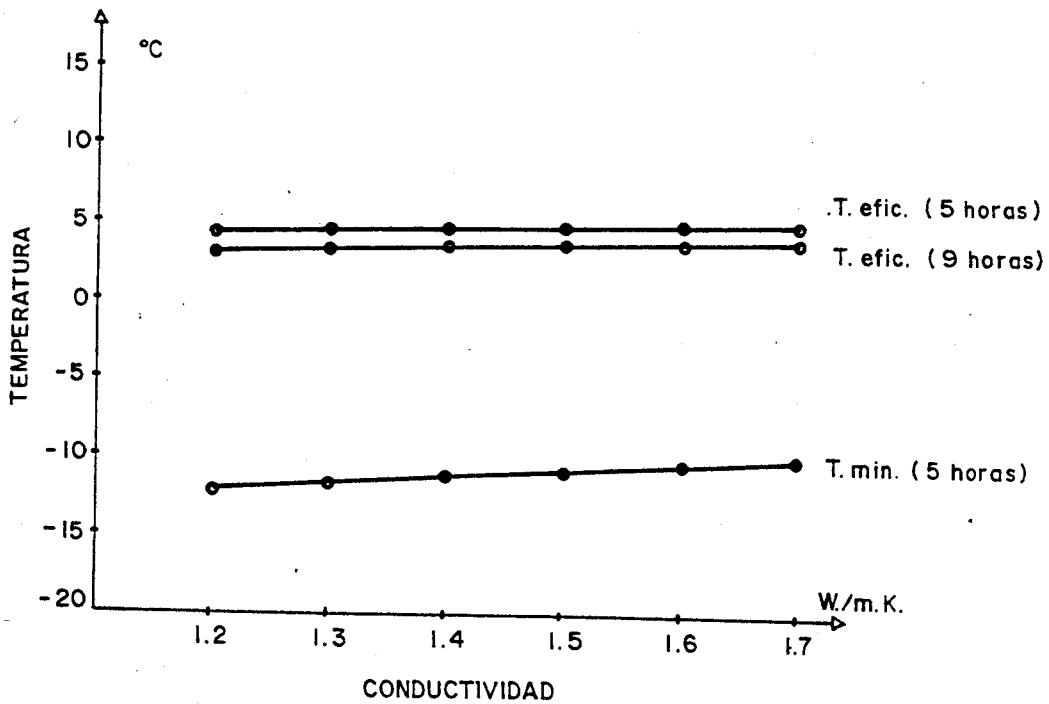


Figura 7.30

En el resto del trabajo se considerará un valor intermedio, con el cual trabajan la mayoría de los autores, de 1,4 W/m.K.

7.1.4. CURVAS DE ENERGIA

En el modelo de tablero de puente considerado en el programa BRIDGE, el flujo de calor es vertical y por tanto las condiciones de contorno se deberán situar en la parte superior del tablero y en la inferior.

Sobre la parte superior se considera el caso de transferencia de calor con el ambiente por convección. La radiación puede ser: absorbida durante el día (onda corta de la radiación solar), y emitida durante la noche (onda larga de emisión térmica al espacio).

En la parte inferior del tablero únicamente se considera la transferencia por convección, debido a que no recibe radiación solar durante el día, y la emisión durante la noche se desprecia puesto que el puente emitiría la radiación térmica contra el suelo que está a una temperatura muy próxima a la del puente y quedaría anulada por la que emite el suelo contra él que es igual a la anterior, (Ley de Stefan-Boltzman. Capítulo 1.1.2).

Por tratarse de condiciones referidas únicamente al contorno la energía absorbida o emitida no dependerá de la geometría del puente, y sí de las condiciones ambientales.

Los tres casos de transmisión de calor (convección y radiación en la parte superior, y convección en la inferior) han sido consideradas en el programa BRIDGE junto con la energía total o suma algebraica de los tres.

Para su representación gráfica se ha elegido los casos típicos: Día caluroso de verano y noche fría de invierno.

El caso de día caluroso de verano considerado es un día medio típico de verano en España, por ser más representativo que un día de máximo calor. La temperatura máxima alcanzada ese día es de 40°C a las 15 horas y la radiación incidente es de 8500 Watios hora/m².

La curva de balance de energías se representa en la figura 7.31.

Es importante destacar que la curva de energía por convección es negativa en gran parte del tiempo ya que cuando el puente alcanza una temperatura superior a la del ambiente se enfría por efecto del aire exterior.

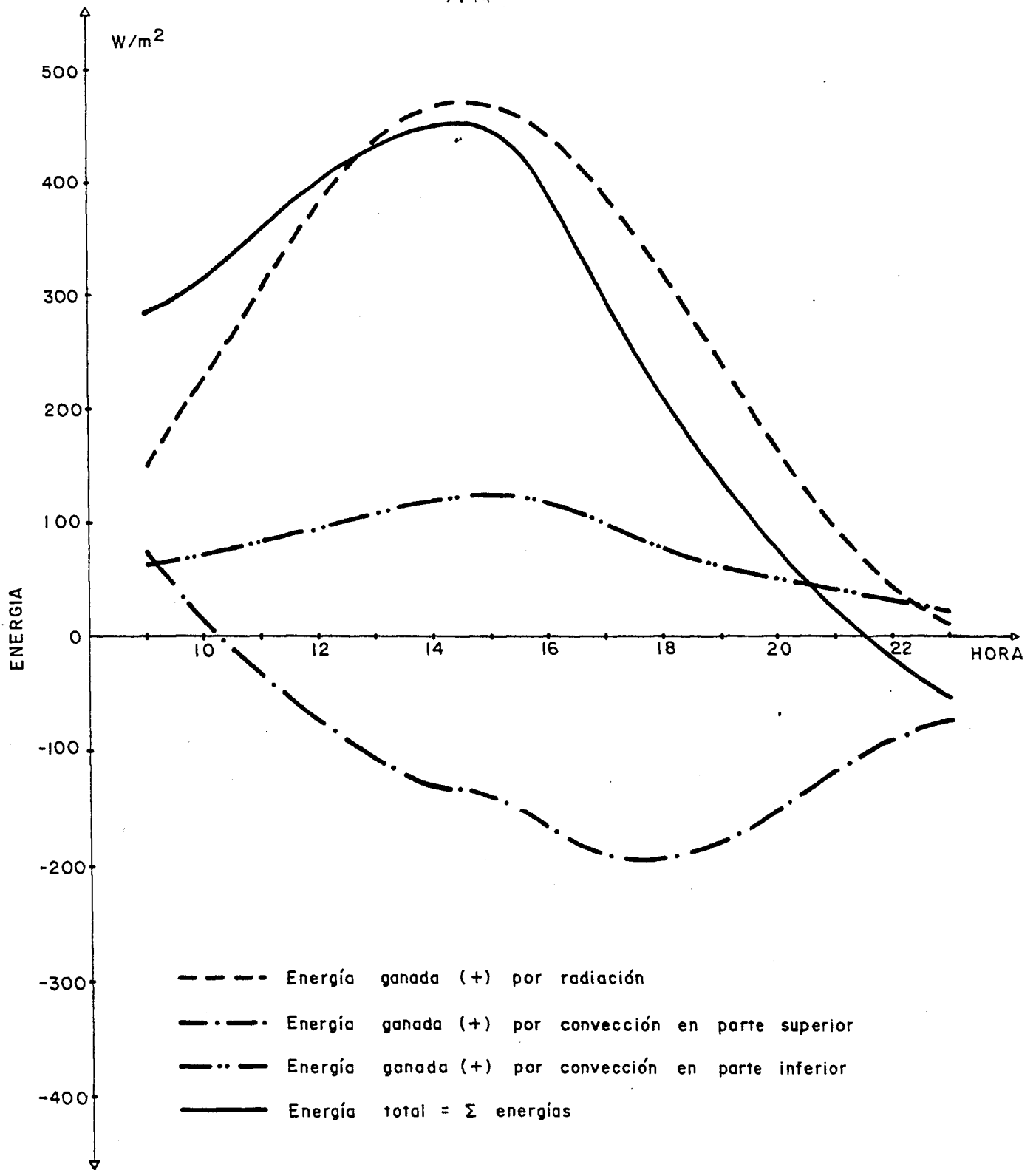


Figura 7.31

Es interesante observar también, la relación entre las magnitudes a cada hora, y se deduce de la figura 7.31, la gran importancia de la energía recibida por radiación con un valor aproximado al de la energía total o suma de energías.

La máxima ganancia de energía se produce entre las 14 horas y las 15 horas con un valor aproximado de 450 W/m^2 hora en que no existe la máxima radiación, aunque sí se tiene la máxima temperatura ambiente.

La noche de invierno elegida es también la noche fría típica en España que se produce multitud de días de invierno en casi toda la península, con una temperatura mínima de -15°C a las 5 horas de la madrugada. La pérdida de radiación es la habitual en noche clara y despejada de invierno con una pérdida de 110 W/m^2 .

La curva de balance de energías se representa en la figura 7.32.

El primer resultado a observar de la figura 7.32 es que todas las energías son negativas, es decir, pérdida de energía, y todas ellas son del mismo orden de magnitud. La máxima pérdida de energía se produce hacia las 5 horas de la mañana coincide con la mínima temperatura con un valor aproximado de 300 W/m^2 como suma de tres valores próximos a

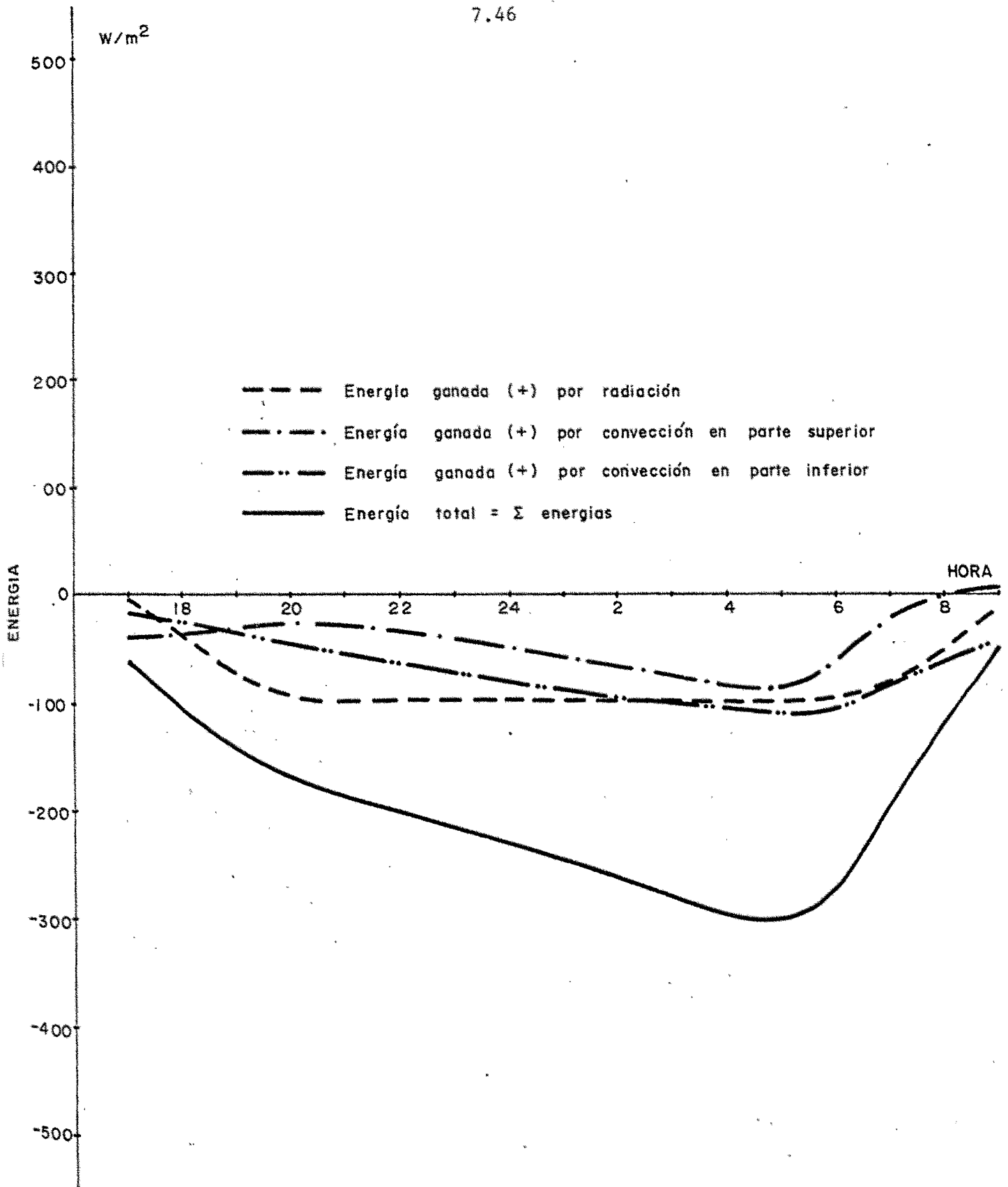


Figura 7.32

los 100 Watios/m² que se pierden por convección en la parte inferior y superior del tablero y por radiación térmica al espacio en la parte superior.

7.1.5. RELACION ENTRE ENERGIA Y TEMPERATURA EFICAZ

La temperatura eficaz es la temperatura que rige el movimiento longitudinal del puente. Dependiendo de la sección transversal del puente puede ser laborioso obtener el valor de esta temperatura ya que deberíamos coger el área entre isoterma y multiplicar por su valor medio en la isoterma y sumar de forma ponderada para cada área.

No obstante se han considerado una serie de hipótesis simplificadoras: El flujo es unidireccional vertical y el tablero se supone como una losa paralelepípedica sin voladizos. En estas condiciones de isoterma son rectas horizontales y el estudio se puede hacer sobre una recta vertical o "columna" de tablero de altura igual al canto del mismo.

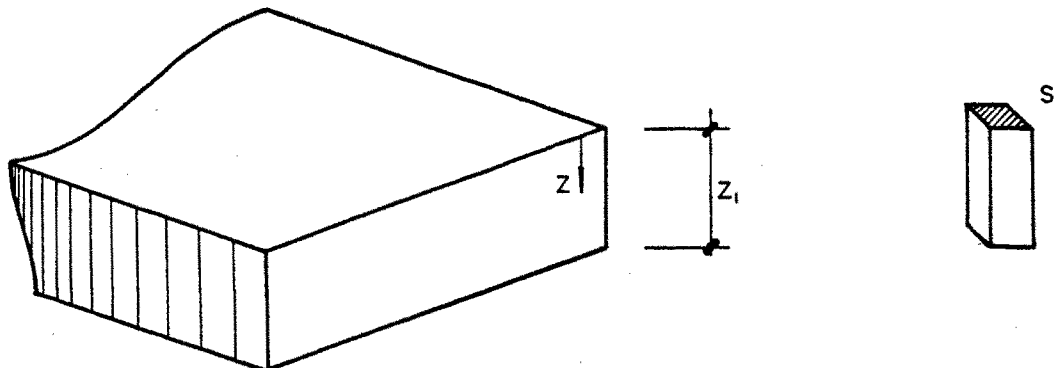


Figura 7.33

Se define matemáticamente la temperatura eficaz como

$$T_e = \frac{\int_0^{z_1} t(z) dz}{\int_0^{z_1} dz} = \frac{\int_0^{z_1} t(z) dz}{z_1} \quad (7.1)$$

El calor entrante producirá un aumento de temperatura:

$$dQ = c.d.m. \Delta t_{(z)} \quad (7.2)$$

$$dm = \rho \cdot S \cdot dz \quad (7.3)$$

De (7.2) y (7.3) se deduce:

$$dQ = C \rho S dz \Delta t_{(z)} = C \rho S dz (t_{(z)} - t_0(z)) \quad (7.4)$$

Integrando (7.4):

$$\int_0^Q dQ = C \rho S \left(\int_0^{z_1} t(z) dz - \int_0^{z_1} t_0(z) dz \right) \quad (7.5)$$

Sustituyendo (7.1) en (7.5)

$$\frac{Q_{\text{acumulada}}}{S} = C \rho (T_{e_T} \cdot z_1 - T_{e_0} \cdot z_1) \quad (7.6)$$

$$T_{e_T} = T_{e_0} + \frac{Q_S}{C \rho z_1} \quad (7.7)$$

La fórmula (7.7) corresponde a la expresión que une la temperatura eficaz del puente en un instante t con la ener-

gía acumulada por unidad de superficie del puente y depende del valor inicial de la temperatura inicial , del producto $\rho.C$ y de la profundidad de la losa Z_1 .

El producto ($\rho.C$) se puede poner además, en función de las propiedades térmicas del hormigón, conductividad K y di fusividad α

$$\rho.C = k/\alpha \quad (7.8)$$

Mediante los resultados del programa BRIDGE se ha repre sentado en una gráfica los valores de la energía acumulada para varios tipos de losas puente a la temperatura eficaz, figura 7.34. Para cada losa se han impuesto condiciones ambientales muy diferentes con rango diario de energía absorbida desde 0 a 400 Watios.hora/m², la condición inicial en todos los casos ha sido de temperatura eficaz 15°C. Los resultados en todos los casos estaban perfectamente alineados según las rectas de la figura 7.34, lo que muestra la concordan cia entre la expresión matemática (7.7) y el programa BRIDGE.

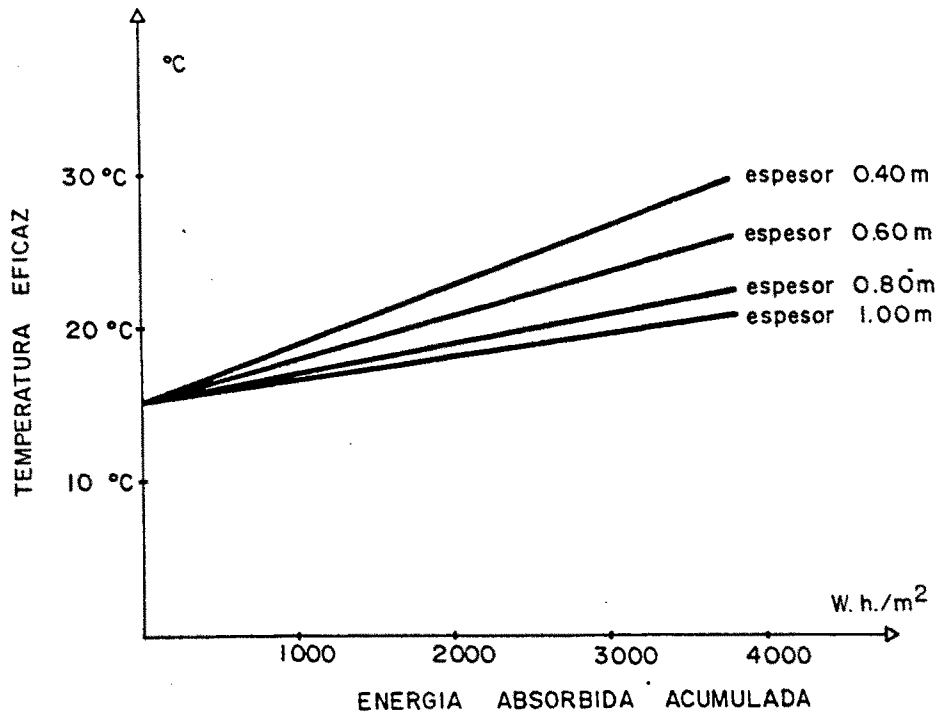


Figura 7.34

7.1.6. INFLUENCIA DE LA RADIACION EN LA ENERGIA

Se ha comentado en el Capítulo 7.1.4 el balance de energías en un puente en un día caluroso de verano. En la Figura 7.31, se observa la importancia que tiene el valor de la radiación con respecto a la energía total.

Sin embargo, al efectuar un estudio paramétrico de la radiación, manteniendo fijos todos los demás valores incluida la temperatura se obtienen los resultados que se pueden observar en la figura 7.3.5. La figura 7.3.5. representa las curvas de energía para los casos de radiación total 2.500 W.h/m², 5.000 W.h/m², 7.000 W.h/m², 8.500 W.h/m² y 9.500 W.h/m².

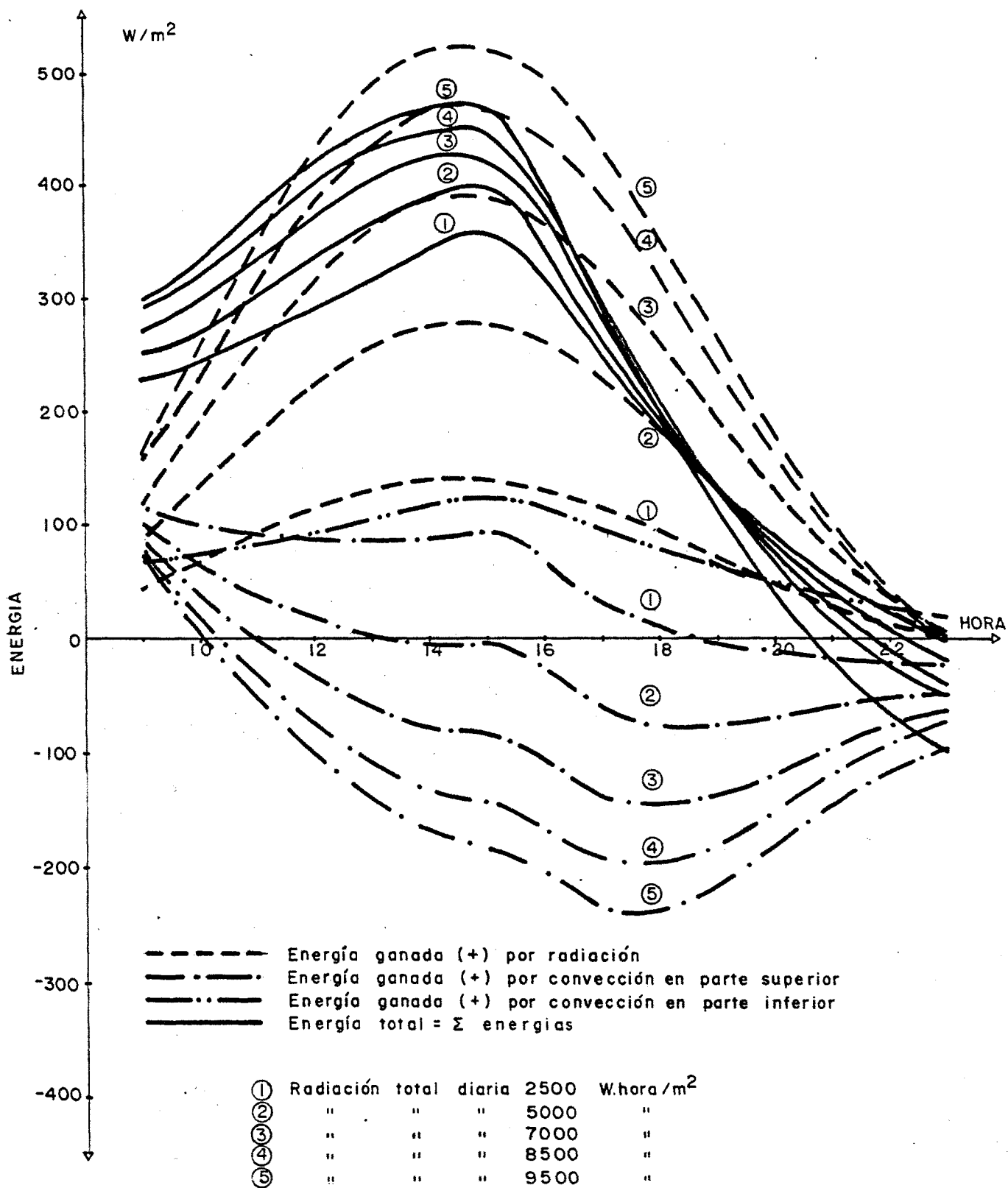


Figura 7.35

En todos los casos la energía ganada por convección en el fondo de la losa es prácticamente constante pero la energía perdida por convección en la parte superior disminuye al disminuir la ganancia por radiación, de forma que el balance total de energías queda amortiguado. Con una disminución próxima al 50% en la radiación incidente (considerando la curva de 9.500 W.h/m^2 o la curva de 5.000 W.h/m^2), solamente hay una diferencia máxima en el balance instantáneo de energía del 85% (465 W/m^2 frente a 397 W/m^2 correspondientes en ambos casos a las 15 horas, según se observa en la figura 7.35).

Por tanto, la importancia del valor de la radiación no es tan acusada como podría parecer con la figura 7.31 debido al amortiguamiento de la caída de energía ya comentado.

Esto demuestra que el balance de energía en un puente y por tanto su estado térmico no depende de unos pocos parámetros si no del conjunto de todas las condiciones meteorológicas ambientales.

7.1.7. INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA

Se ha considerado en todos los casos del programa BRIDGE una distribución de temperaturas a lo largo del día, o a lo largo de la noche, del tipo triangular (figuras 9.6 y 9.7) de forma que durante 24 horas se puede suponer una distribución de una onda completa del tipo diente de sierra.

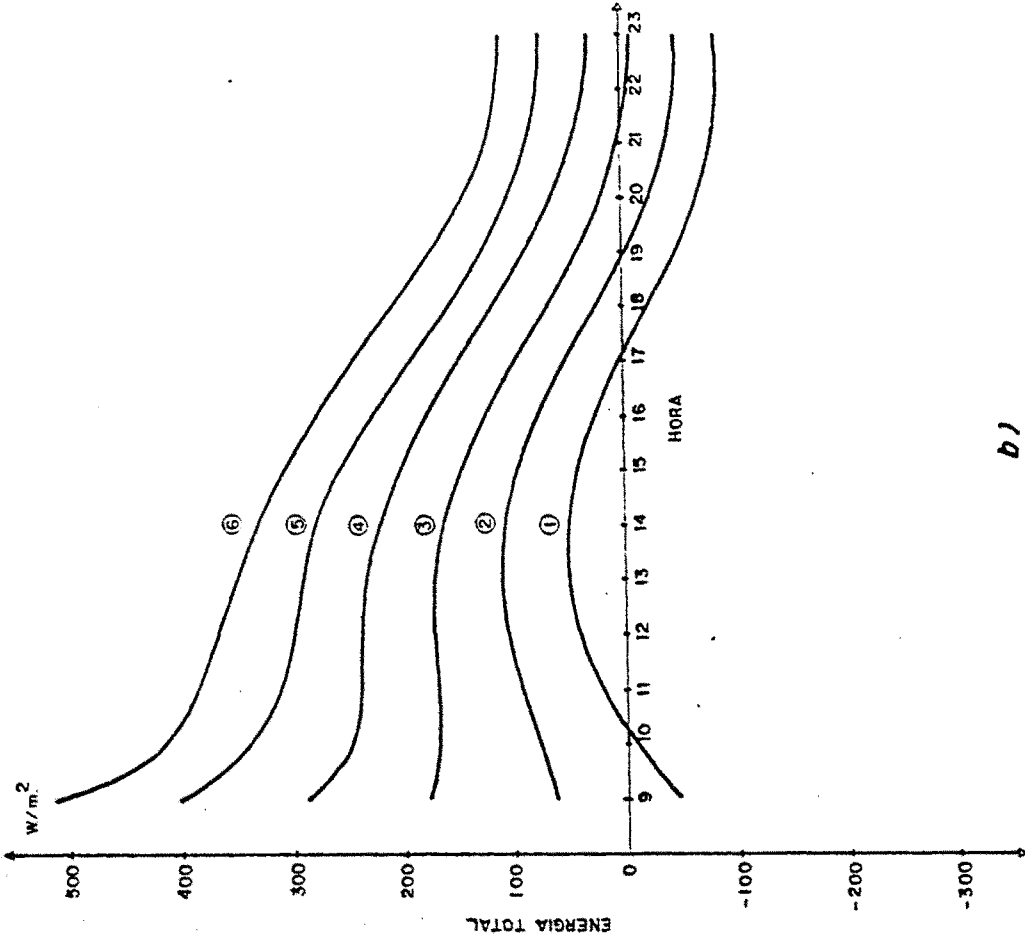
Como el programa se ejecuta por separado para el día y para la noche se han pasado los casos independientemente, su poniendo que el día corresponde a un día caluroso de verano y la noche a una noche fría de invierno.

Las distribuciones de temperaturas consideradas en cada uno de los dos casos han sido:

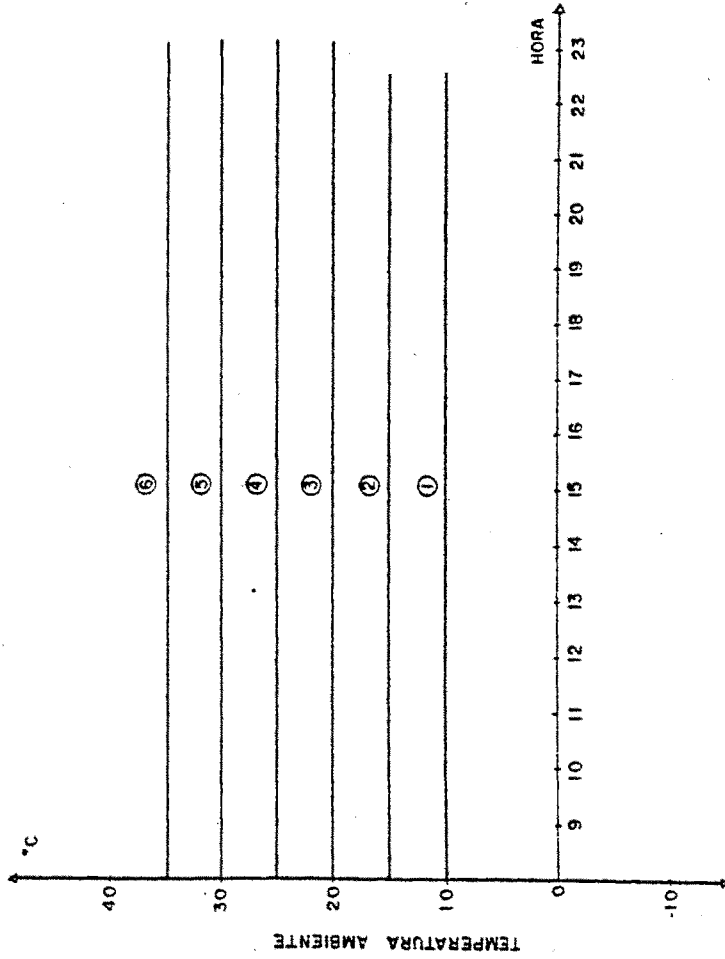
- Diferentes temperaturas uniformes a lo largo del tiempo considerado (día o noche) (figuras 7.36 y 7.37).
- Temperaturas medias constantes pero variando la oscilación a lo largo del tiempo figuras 7.38 y 7.39.
- Variación de la temperatura media, variando únicamente el pico de la temperatura en el tiempo considerado. Fi guras 7.41 y 7.42.

En todos los casos diurnos, al cambiar la temperatura a lo largo del día no es lógico que la radiación tenga niveles máximos y por ello, se considera la radiación correspondiente a un día medio de verano con 6.000 W.h/m^2 . En todos los casos se ha supuesto una temperatura inicial del puente para el cálculo diurno de 15°C y de 10°C para el cálculo nocturno.

En la figura 7.36a se muestran los seis casos considera dos todos ellos de temperatura constante entre 10°C y 35°C

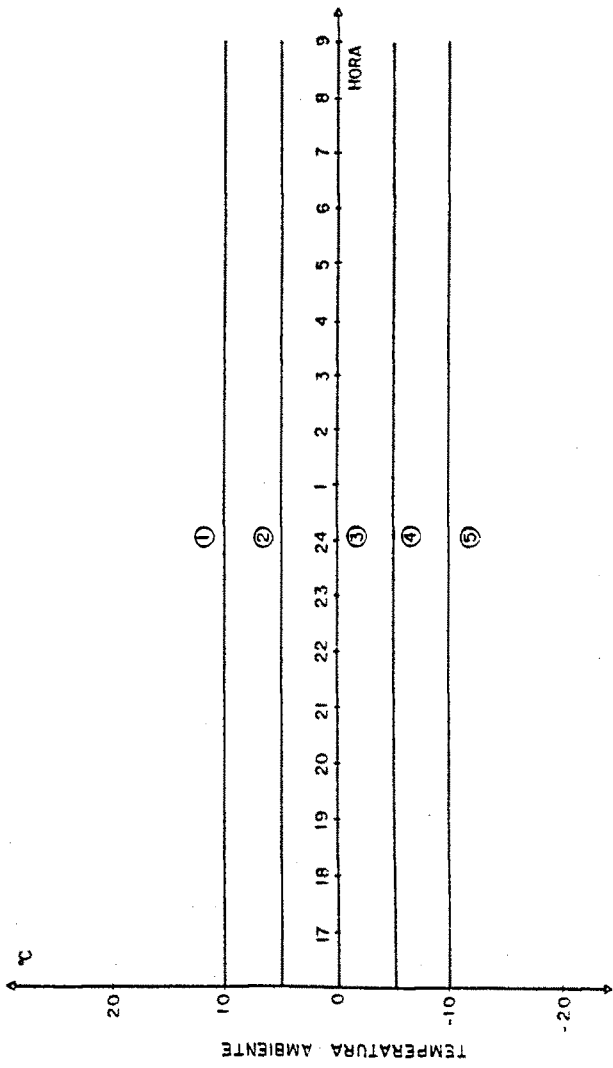


b)

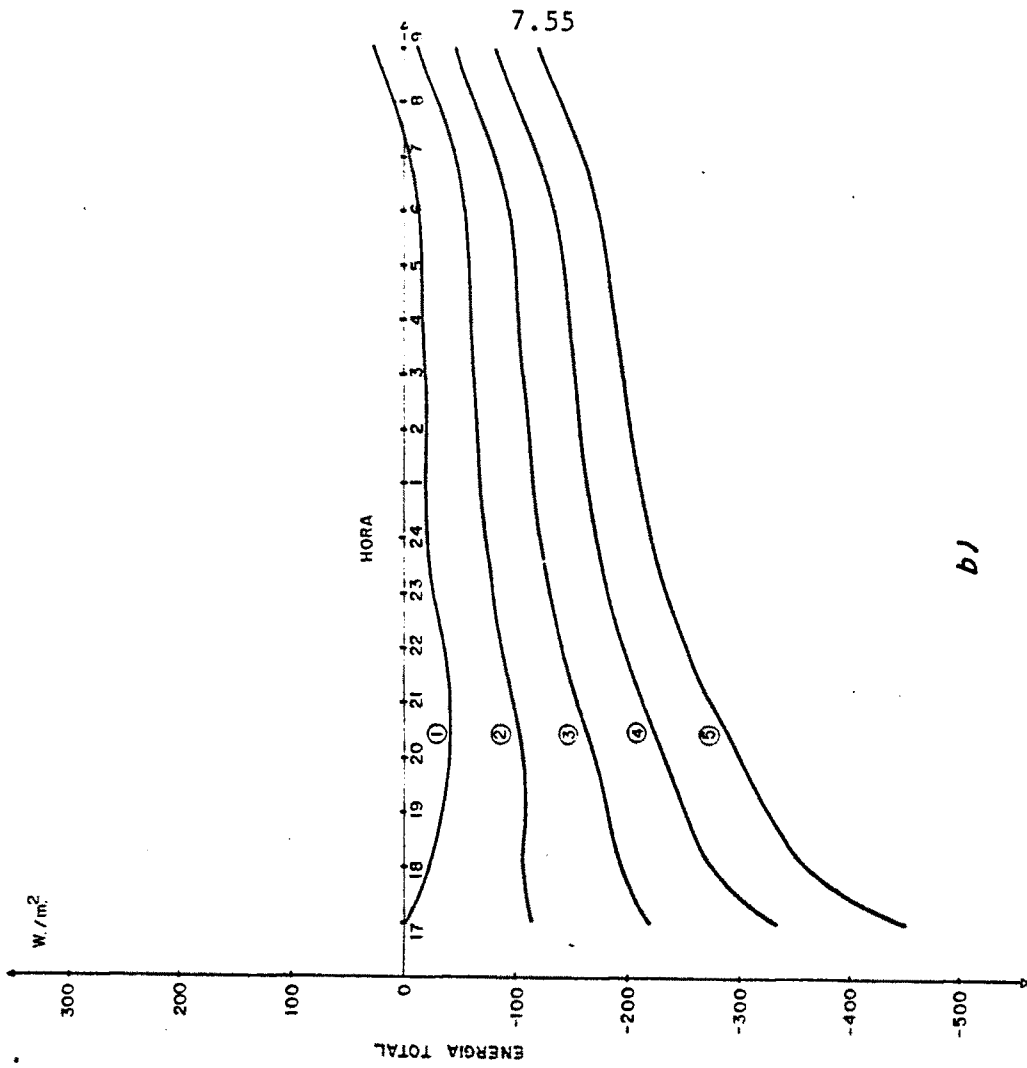


a)

Figura 7.36



a)



b)

Figura 7.37

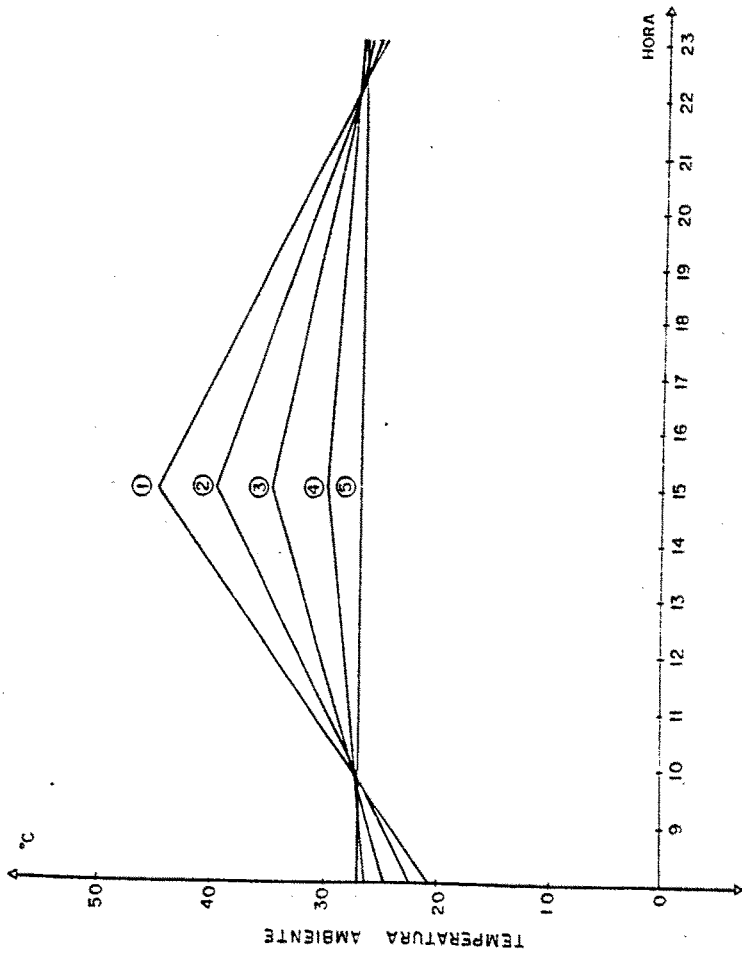
durante todo el período de 15 horas. En la figura 7.36b se representan las gráficas de energía total resultante en el tablero. En dicha figura se pueden considerar como válidos o representativos, únicamente las curvas a partir de las 11 horas para anular el efecto de temperatura inicial en el puente.

Durante las horas claves del día (entre 11 horas y las 18 horas) las curvas son todas ellas paralelas (igual que las curvas de temperaturas) y la distancia entre ellas en energía instantánea es siempre próxima a 50 W/m^2 por cada 5°C de diferencia de temperaturas.

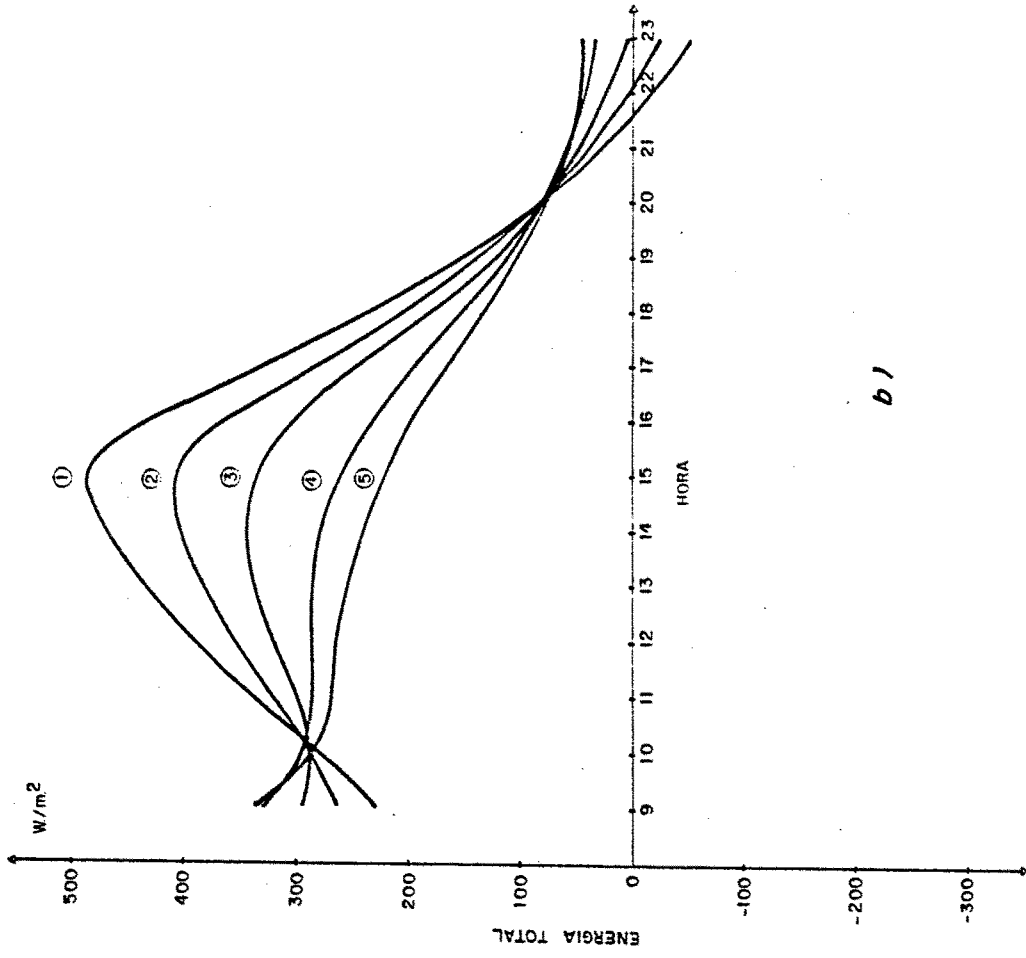
El caso nocturno se estudia en la figura 7.37a para la distribución de temperaturas y 7.37b para la consiguiente distribución de energías. Las consecuencias que se pueden extraer son las mismas que para el caso diurno. Las distribuciones de energías, son sensiblemente paralelas entre sí y tendentes a la horizontal, igual que la distribución de temperaturas y la separación entre curvas es también próxima a 50 W/m^2 por cada 5°C de diferencia de temperatura ambiente.

Este dato supone que en un día de 12 horas de radiación solar supone una diferencia de energías totales absorbidas por cada grado centígrado de variación de la temperatura ambiente de:

$$E = \frac{50 \text{ W/m}^2 \cdot 12 \text{ horas}}{5^\circ\text{C}} = 120 \frac{\text{W.hora}}{^\circ\text{C}} \quad (7.9)$$



a)



b)

Figura 7.38

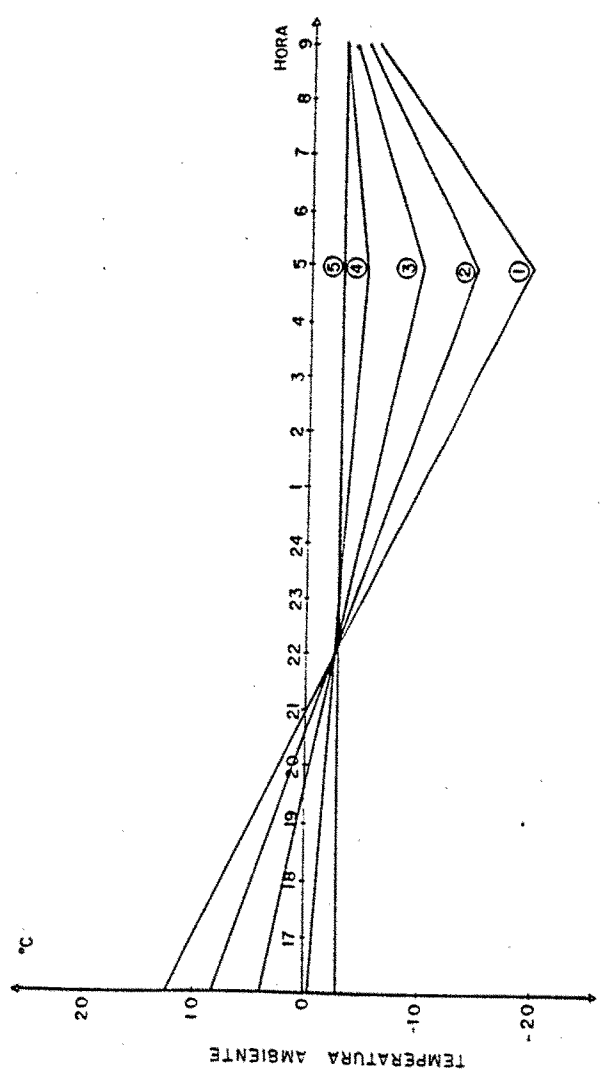
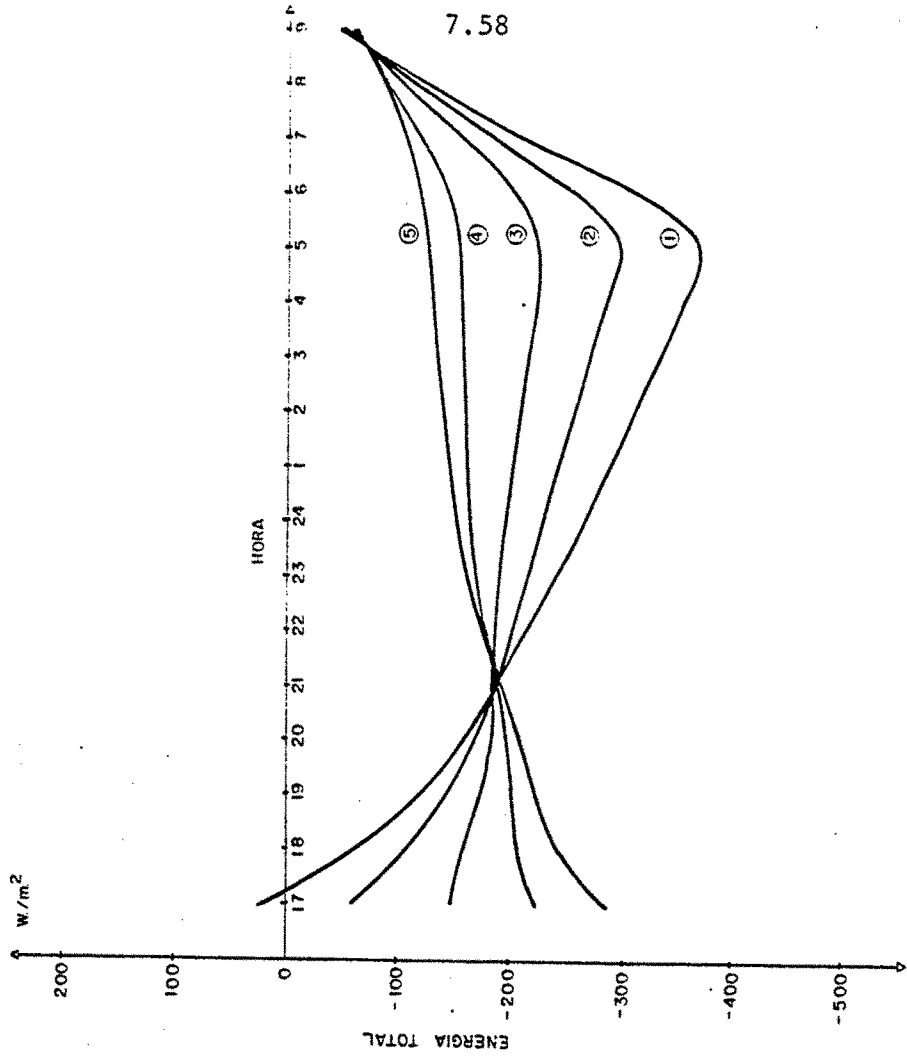


Figura 7.39

Por tanto la influencia de la temperatura ambiente sobre el estado térmico del puente es mucho más importante que lo que podría indicar la figura 7.31 y queda cuantificado para un día completo según la fórmula aproximada (7.9).

El segundo caso de variación de temperaturas se refiere a temperatura media constante en todos los casos, pero variando la oscilación de la onda de temperaturas (figuras 7.38 y 7.39). Para el estudio diurno, considerará la zona de máximas temperaturas (pico de temperaturas a las 15 horas) (figura 7.38a) y el cálculo nocturno considerará la temperatura mínima con el pico a las 5 horas (figura 7.39a).

En las figuras (7.38b) y (7.39b) se representan las gráficas de temperatura ambiente y las correspondientes energías totales diurnas. Existe una gran semejanza entre ambas curvas que permite relacionar la energía total en el puente entre las 10 horas y las 20 horas, con la oscilación de la temperatura ambiente y que se puede observar en la figura 7.40a.

El mismo cálculo se repite para el caso nocturno. En las figuras 7.39a y 7.39b se muestran las temperaturas consideradas y las energías totales sobre el tablero. La concordancia entre ambas figuras también es notable. También se dibuja la gráfica de energías totales perdidas en el período entre las 22 horas y las 9 horas frente a la oscilación de la temperatura en la noche (figura 7.40b).

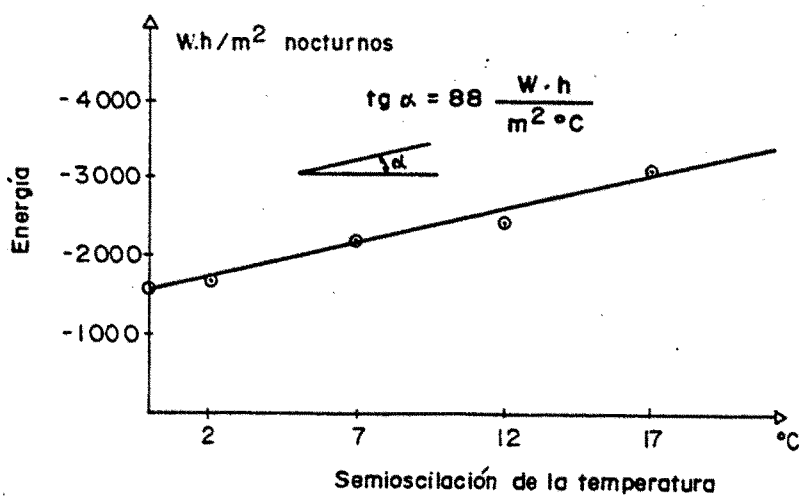
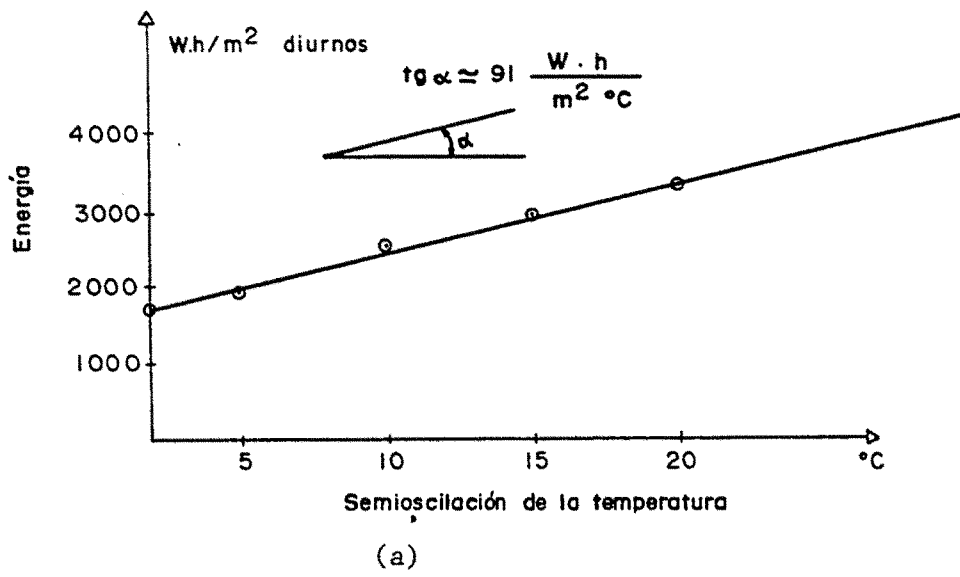


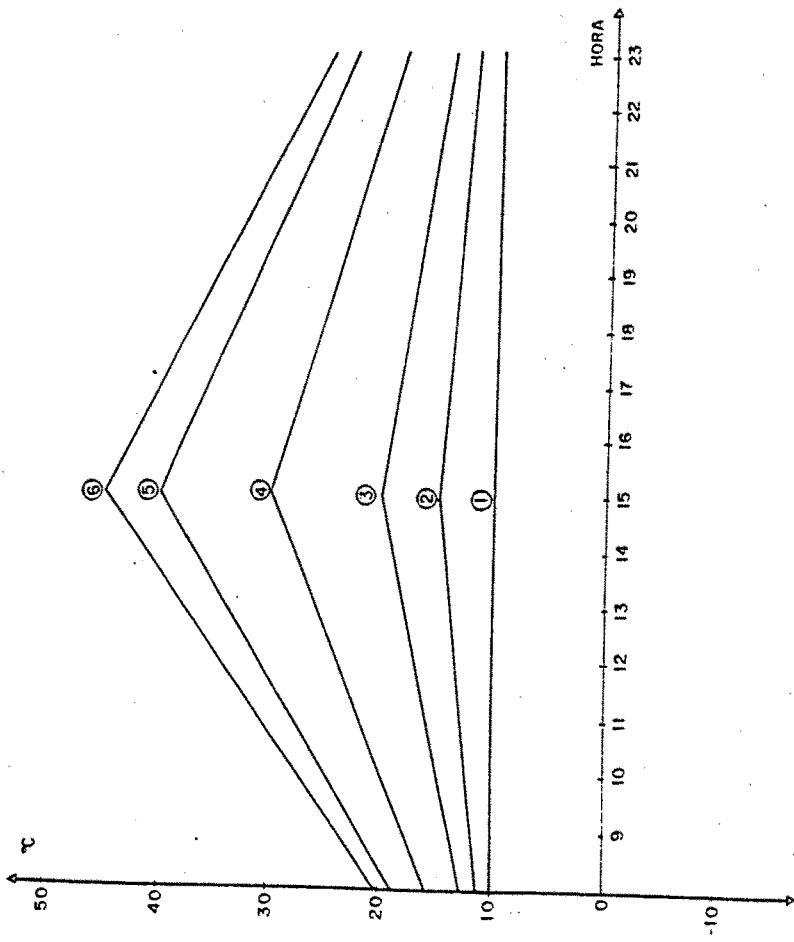
Figura 7.40.

El resultado de las gráficas 7.40a y 7.40b, indica que ambas rectas tienen prácticamente la misma pendiente $90 \text{ w.h/m}^2\text{°C}$ que depende lógicamente del resto de las condiciones ambientales, pero que no obstante permite mostrar la variación lineal de la energía absorbida en función de la oscilación de la temperatura ambiente.

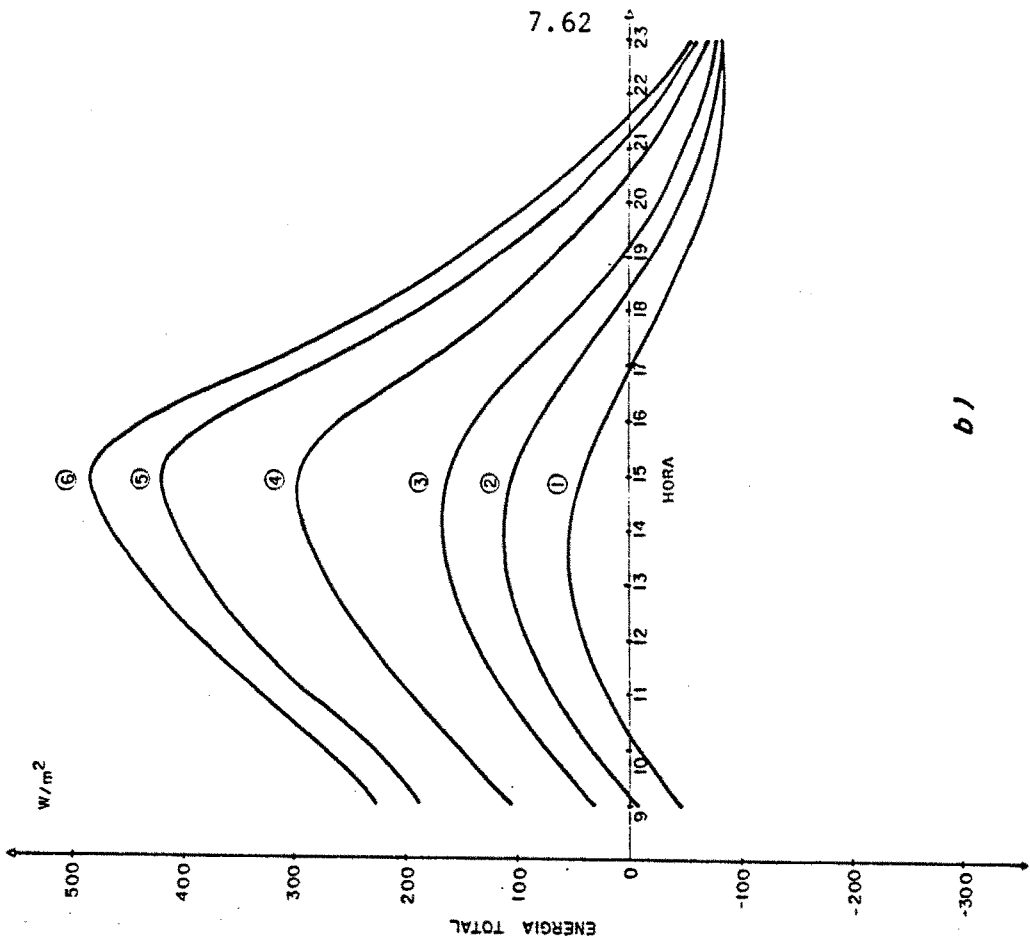
Además el incremento positivo de energía durante el día por cada grado de aumento de la oscilación de temperatura, se ve compensado por la pérdida de esa misma energía durante la noche (puesto que ambas curvas tienen la misma pendiente) y por tanto el balance del día (24 horas) queda constante, dependiendo solo de la temperatura media, según la fórmula aproximada (7.9).

Se ha efectuado también un cálculo intermedio entre los dos casos anteriores de variación de temperatura; se considerará un espacio de tiempo de 24 horas pero la onda de temperaturas se tomará de período 48 horas.

De esta forma en el caso de cálculo para un día caluroso todas las temperaturas estarán por encima de la media de 48 horas (figura 7.41a) y en el caso de cálculo para día frío todas las temperaturas se tomarán por debajo de la media de la onda de 48 horas. (Figura 7.42a).

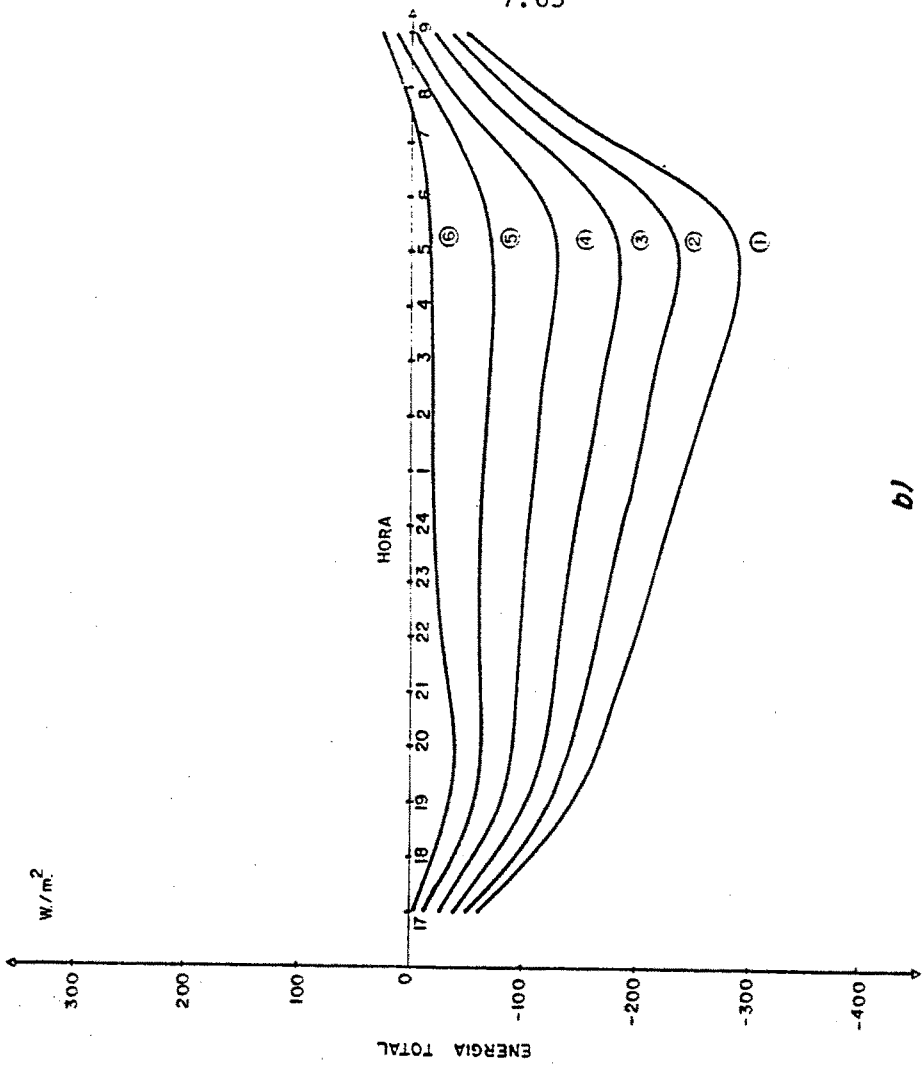


a)

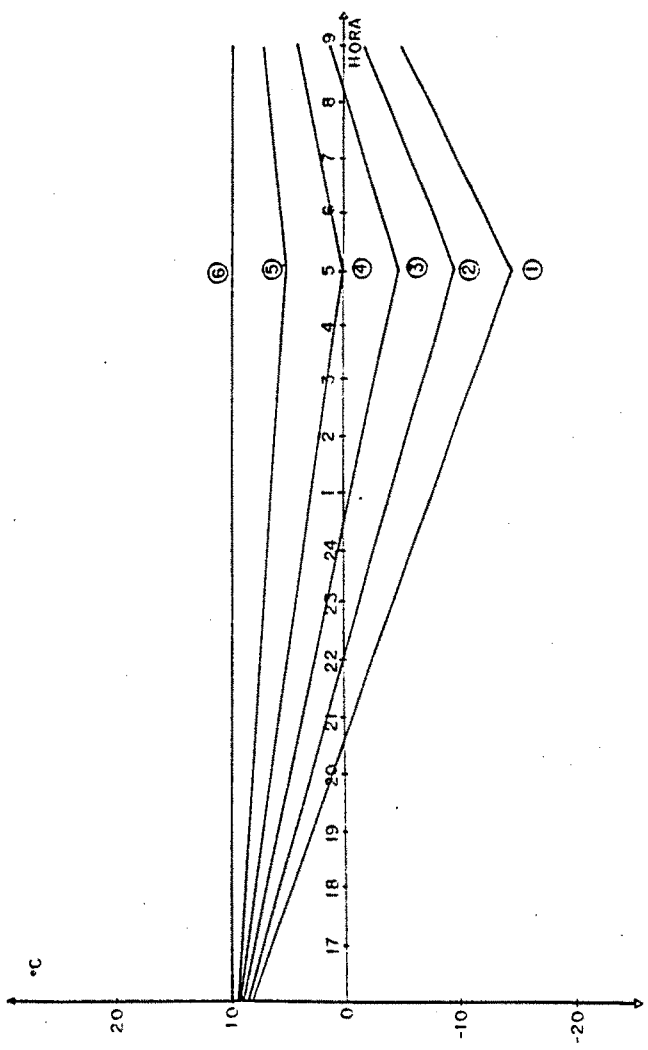


b)

Figura 7.41

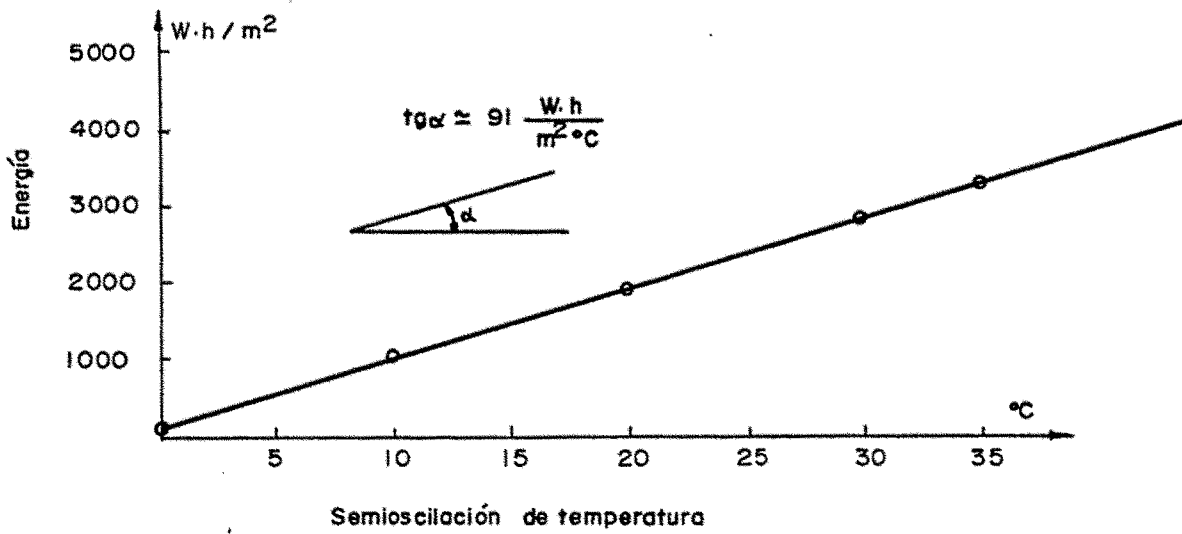


b)

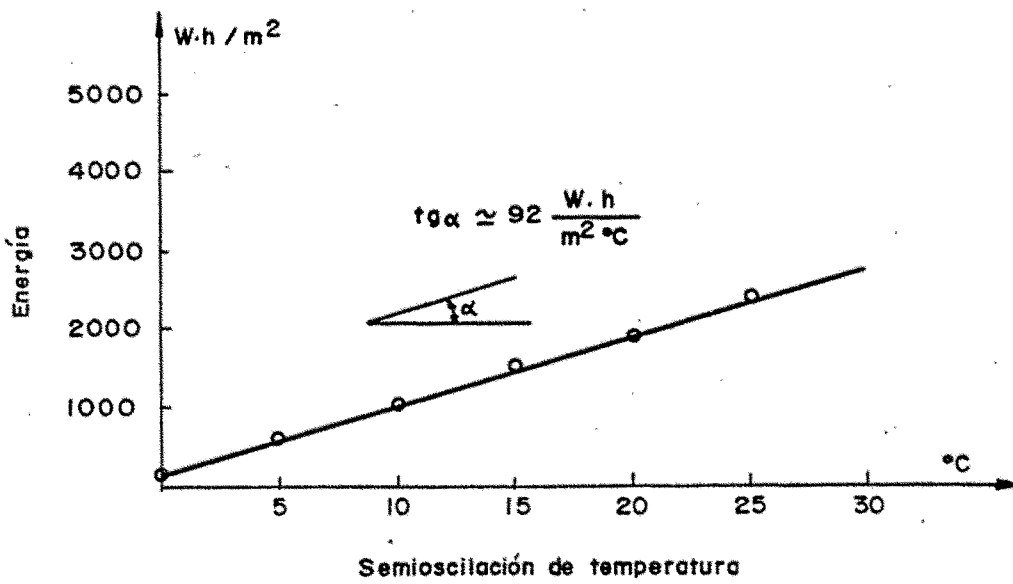


a)

Figura 7.42



a)



b)

Figura 7.43

El resultado de las energías totales se muestra en las figuras (7.43a) y (7.43b) y en ellas se muestra la variación de energía respecto a la variación de la oscilación de la onda en un intervalo de tiempo entre las 10 horas y las 20 horas para el caso diurno y las 22 horas y las 9 horas para el cálculo diurno.

El resultado es que la pendiente de las rectas es prácticamente igual que en el caso de onda de 24 horas de duración (figuras 7.40a y 7.40b), y el valor de la variación de energía es de 90 W.h/m^2 por cada grado centígrado de oscilación de la onda térmica cualquiera que sea su período.

7.1.8. INFLUENCIA DEL COEFICIENTE DE CONVECCION

En el programa BRIDGE el coeficiente de convección está considerado en tres situaciones diferentes acordes con la realidad. Se introduce un coeficiente de convección interior entre las superficies horizontales del hueco de un tablero de sección cajón (Capítulo 1.1.3.3.) y dos coeficientes de convección en el contacto aire-tablero, uno en la parte superior y otro en la parte inferior del tablero.

Se considera la influencia de los tres coeficientes de convección por separado.

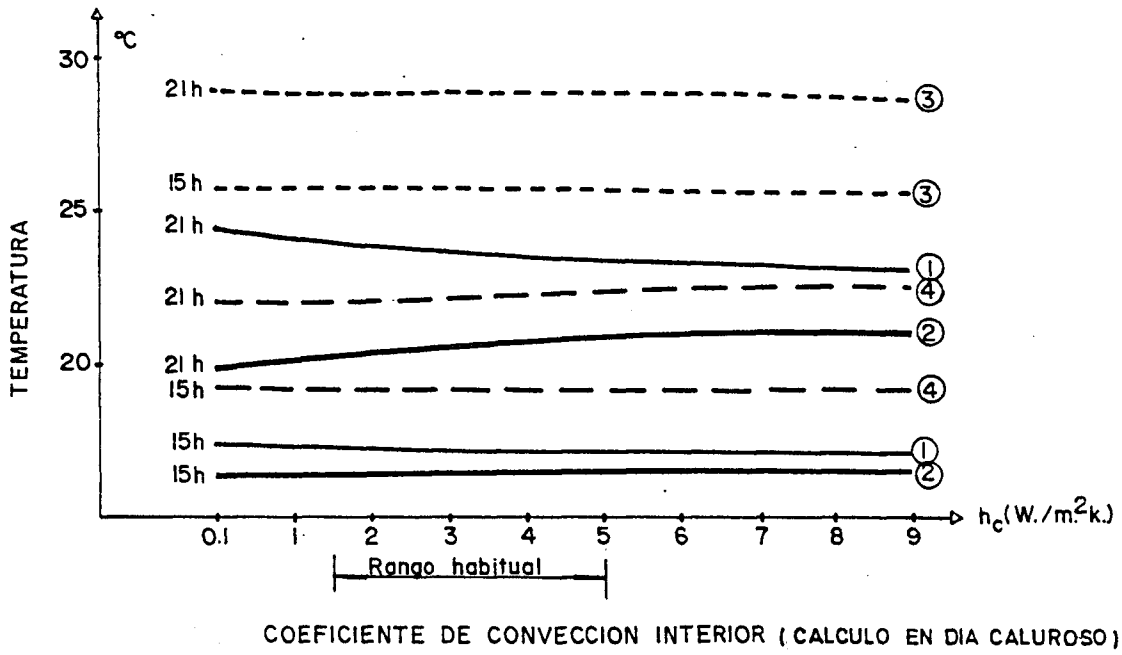
El coeficiente de convección en el interior se estudia comparando las temperaturas medias de los forjados inferior y superior del tablero y comparando la temperatura en las superficies horizontales de la sección cajón en su parte interior (figura 7.44c).

Los resultados se expresan en las gráficas de las figuras 7.44a y 7.44b. Se ha destacado la banda de variación del coeficiente de convección interior entre superficies que puede considerarse entre $1,5 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ y $5 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ (capítulo 1.1.3.3.).

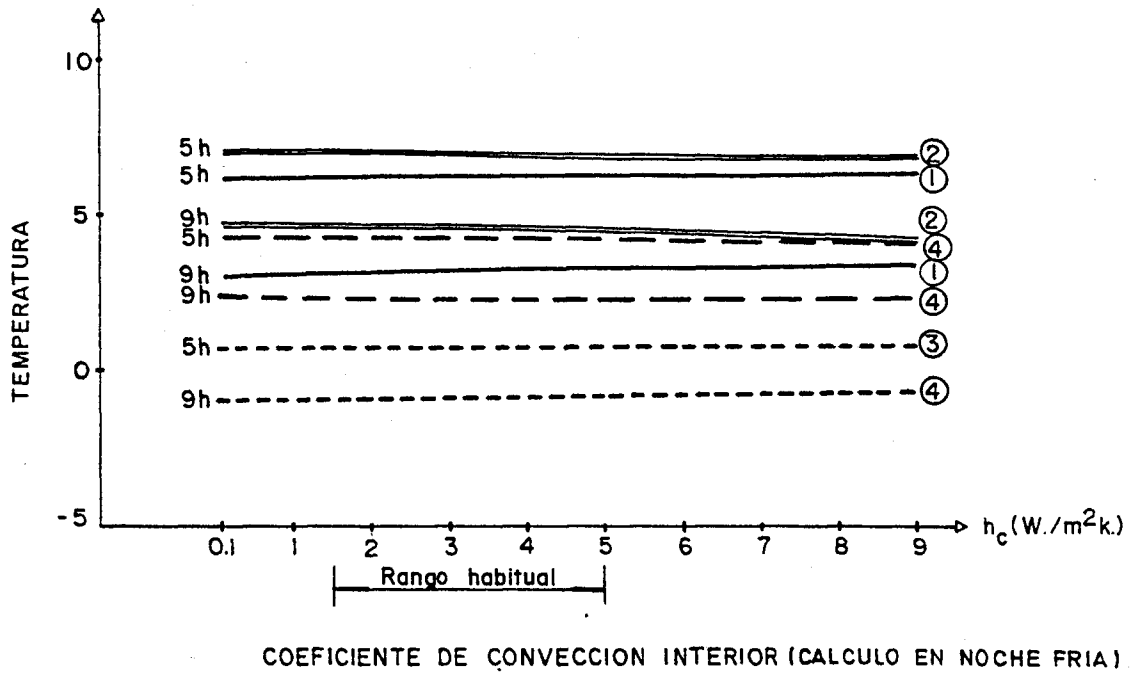
Los valores de la temperatura media en los forjados es independiente del valor del coeficiente de convección, gráficas 3 y 4. Se han representado las gráficas para las horas en que la temperatura ambiente es máxima (15 horas en cálculo diurno) y mínima (5 horas en cálculo nocturno) además de las gráficas correspondientes a temperatura eficaz máxima (21 horas en cálculo diurno) y mínima (9 horas en cálculo nocturno).

La temperatura en los puntos 1 y 2 también se muestra muy constante con una oscilación máxima (para la misma hora) de 1°C dependiendo del coeficiente de convección.

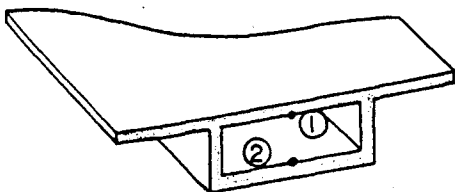
La conclusión es que el valor del coeficiente de convección interior en una sección cajón no es condicionante para



a)



b)



- ③ Media del forjado superior
- ④ Media del forjado inferior

c)

Figura 7.44

el estado térmico del tablero de puente, si se mantiene dentro de los límites habituales.

El valor del coeficiente de convección en el exterior ya se indicó en el capítulo 1.1.3. que depende fundamentalmente de la velocidad del viento en cada instante y Falkner (2) indicaba la expresión:

$$h_c = 5,58 + 3,38 v \quad (7.10)$$

siendo h_c = coeficiente de convección ($W/m^2.K$).

v = velocidad del viento (m/seg.).

Como en todos los casos, se ha hecho el estudio para los casos de noche fría de invierno y día caluroso de verano. Se ha considerado, igualmente por separado, el caso del coeficiente de convección en la parte superior y en la parte inferior.

El coeficiente de convección en la parte superior se ha considerado con valores comprendidos entre $1 W/m^2.K$ y $100 W/m^2.K$. El primer caso es un valor muy por defecto del mínimo posible, según Falkner, ya que para velocidad de viento nula resulta un coeficiente de convección de $5,58 W/m^2.K$, igualmente el valor de $100 W/m^2.K$, equivale a una velocidad del viento de $28 m/seg.$ o $100 Km/h.$ Por tanto, todos los posibles valores de h_c están comprendidos dentro

de la banda $1 \div 100 \text{ W/m}^2$. con el fin de no precisar extrapolar en ningún caso. Los valores habituales estarán comprendidos entre $20 \div 40 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$.

Los resultados para el día y para la noche se muestran en las figuras 7.45 y 7.46. Se dibujan todas las curvas de balance de energía en el tablero por cada uno de los conceptos (radiación, convección en zona superior, en zona inferior y radiación total). En el caso de energía transmitida en la parte superior aparecen diferentes curvas para cada valor del coeficiente de convección y las consiguientes curvas de energía total. Los valores habituales están en cada caso entre las curvas 3 y 4 y por tanto, la posible variación en la energía total instantánea no es superior a 40 W/m^2 que supone valores inferiores al 10% de la energía total instantánea.

Por tanto, el valor del coeficiente de convección en la parte superior, si se mantiene dentro de los límites normales no supone en ningún caso variaciones de la energía total diaria superiores al 10%.

El caso del coeficiente en la parte inferior es similar al caso anterior, no obstante el coeficiente de convección considerado es menor que el de la parte superior ya que se supone que es una zona menos libre o despejada y la veloci-

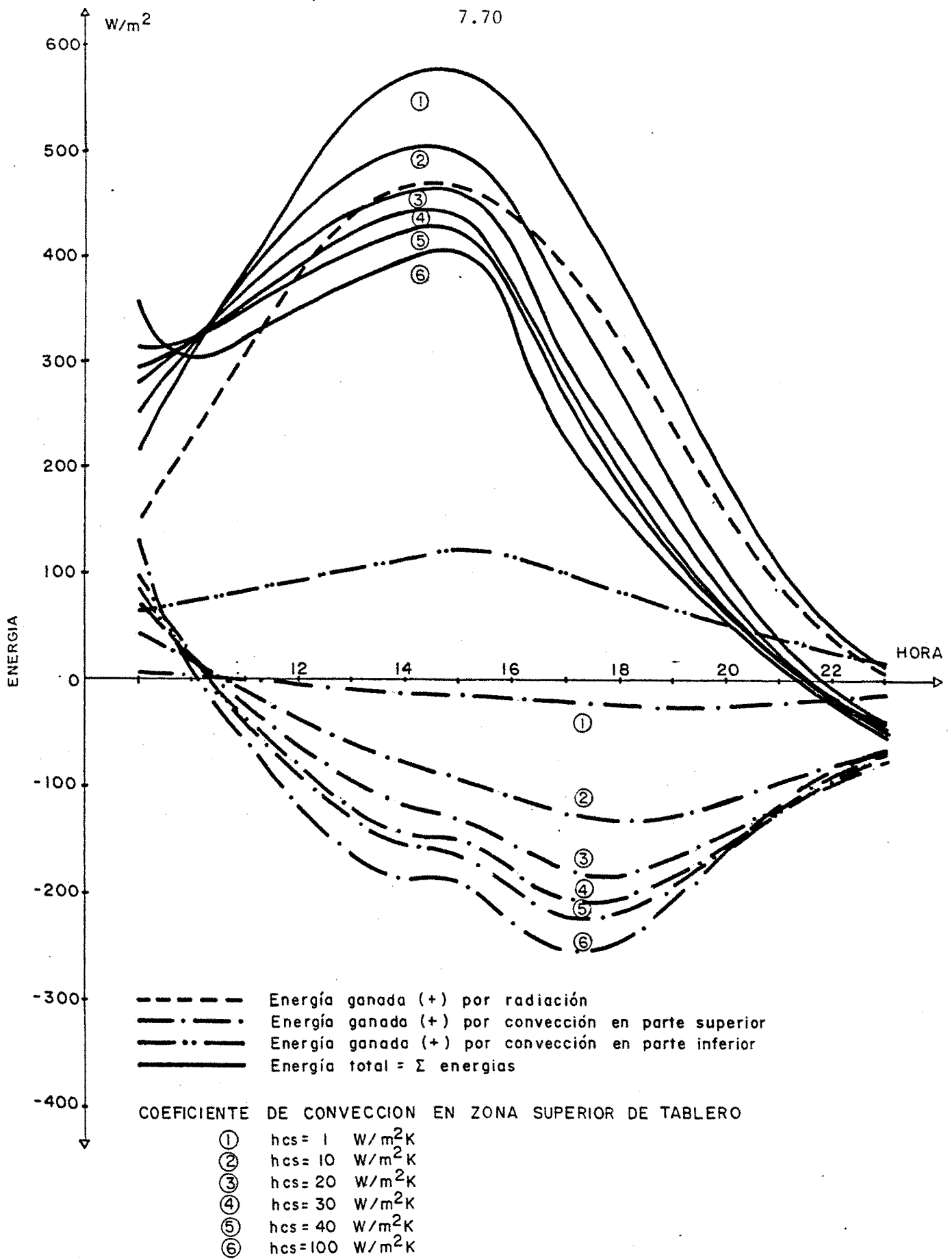


Figura 7.45

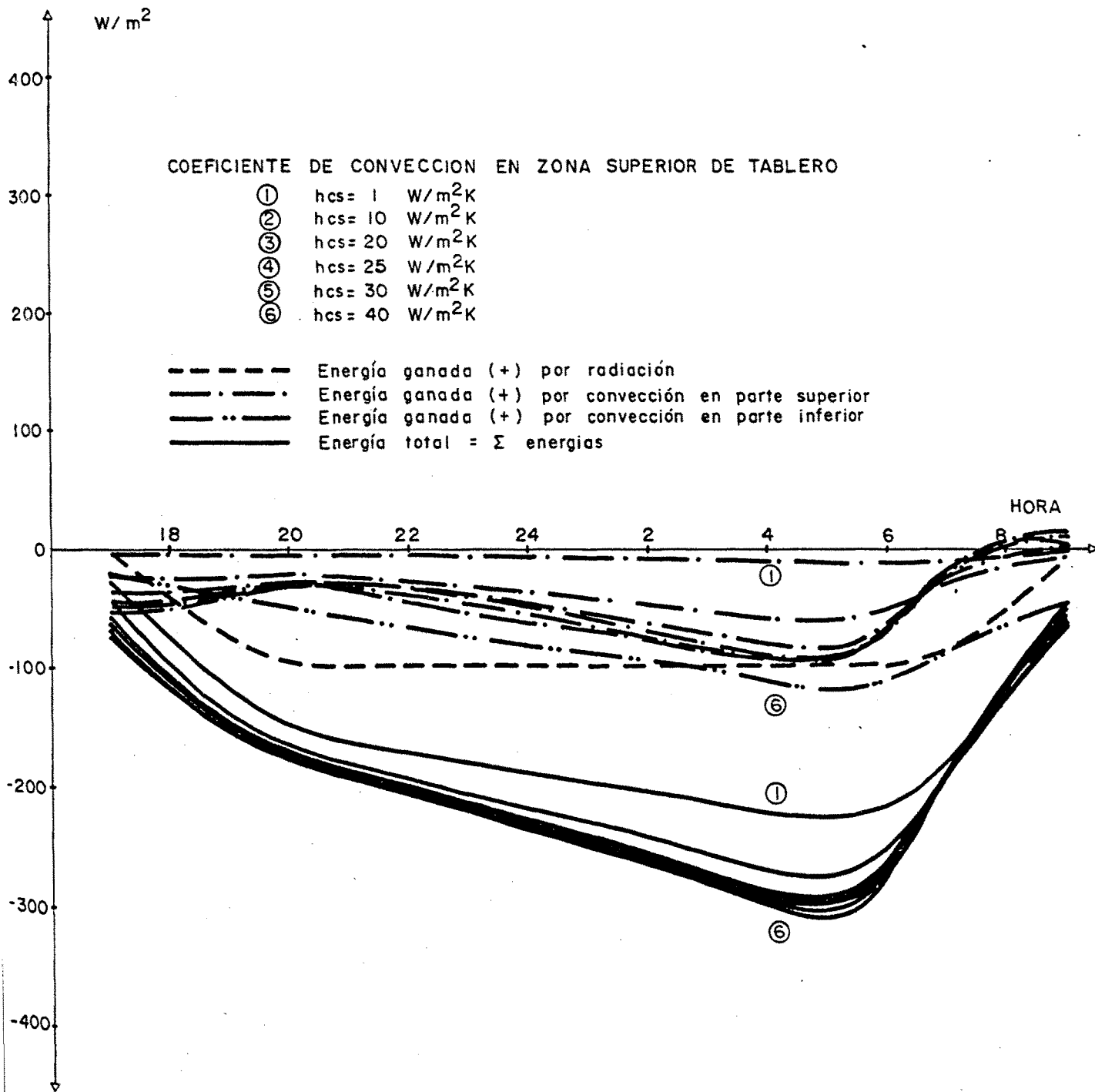


Figura 7.46

dad del viento será menor, además en la parte superior el coe ficiente de convección, es un coeficiente que engloba los tér minos de convección y radiación, llamado coeficiente de convec ción radiación (capítulo 1.1.3.4.) cuyo valor es superior al de la parte inferior.

Se consideran, por tanto, los valores comprendidos en la banda $1 \pm 20 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ para el coeficiente de convección en la zona inferior. Los resultados para cálculo en día caluroso y no che fría se muestran en las figuras 1.47 y 1.48.

Los valores de la energía total instantánea para los coe ficientes de convección habituales, no sufren una oscilación superior al 10% del valor total de la energía total instantánea, siendo un valor prácticamente igual que en el caso de convección en la cara superior.

Por tanto, en ambos casos de coeficiente de convección en la parte superior e inferior del tablero del puente, y en el supuesto de que se mantengan dentro de banda de valores habituales no será un condicionante del estado térmico del puente, ya que no supondrán en ningún caso variaciones de la energía total diaria superiores al 10% de la misma.

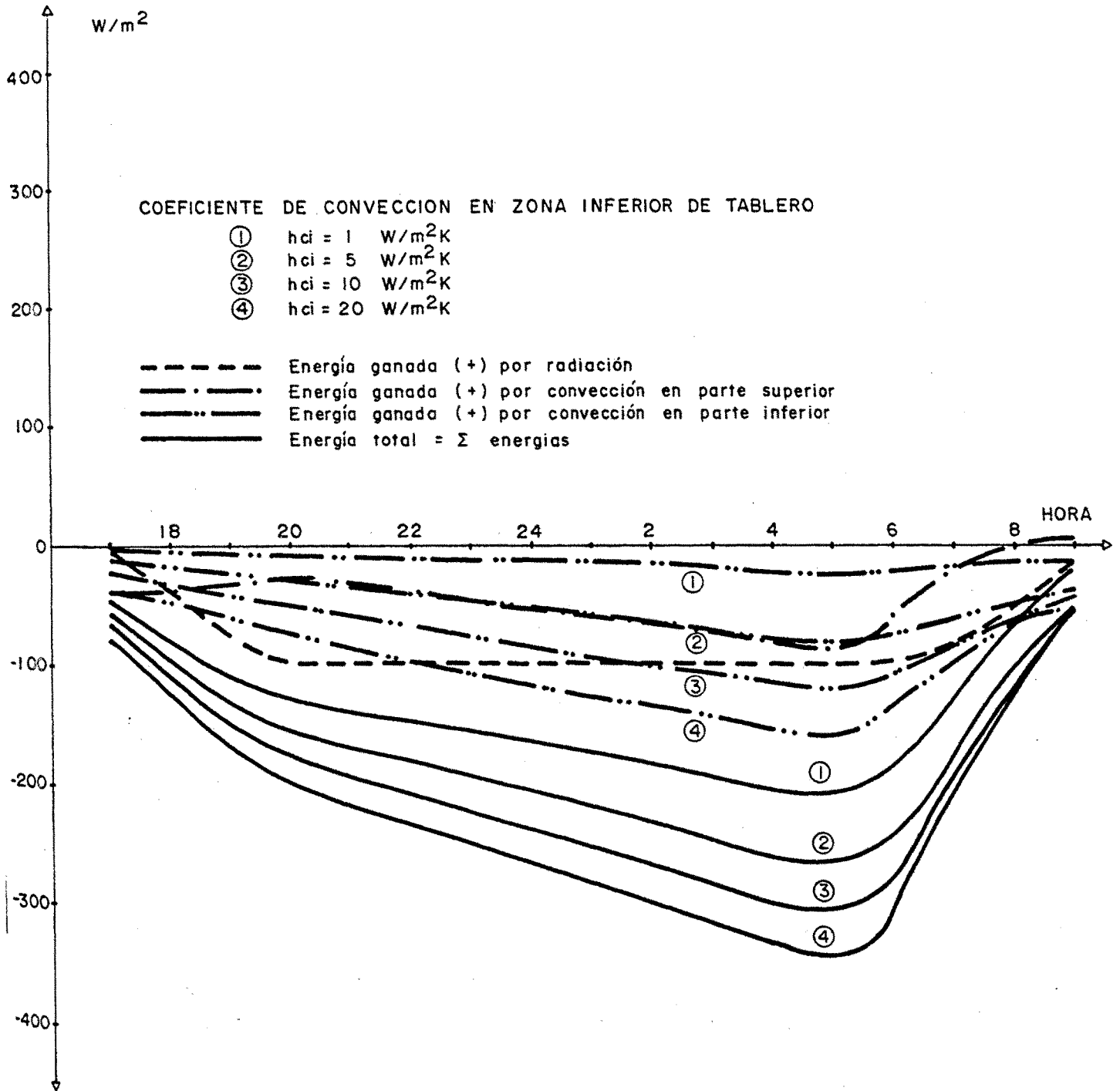


Figura 7.47

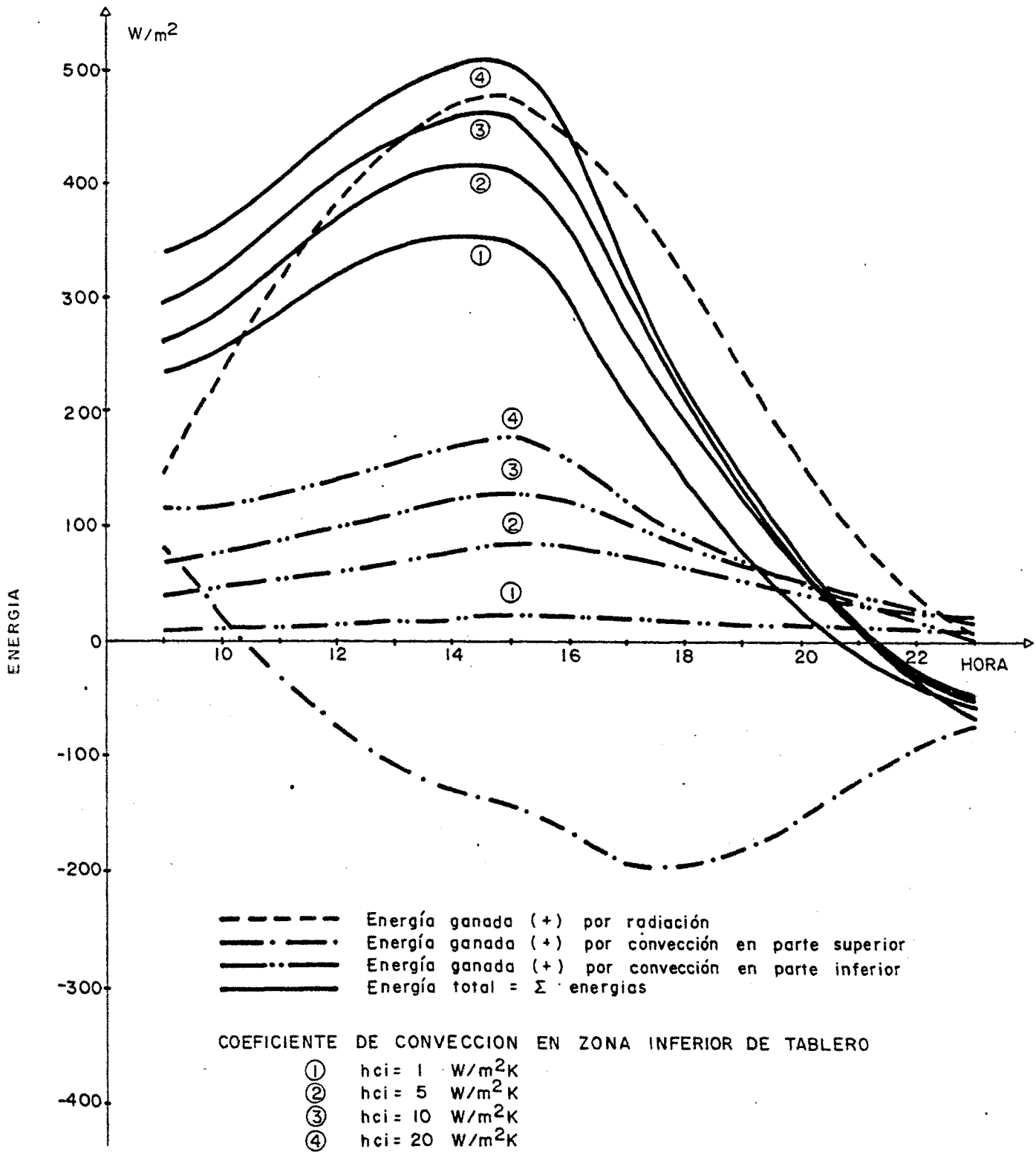


Figura 7.48

7.1.9. ESTUDIO DE LA TEMPERATURA EFICAZ

En el capítulo 7.1.5 se ha estudiado la relación lineal existente entre la energía absorbida acumulada y la temperatura eficaz del tablero, y la dependencia que existe del espesor del tablero.

En el presente caso, se estudia la evolución en el tiempo de la temperatura eficaz de un puente losa de diferentes espesores. Las condiciones ambientales consideradas son las habituales para los coeficientes de convección, y se estudian el caso de día caluroso de verano con radiación máxima de 9.500 W.h/m^2 , y noche fría de invierno. Las temperaturas iniciales del puente son 15°C en el caso de día caluroso y -2°C para la noche fría de invierno.

En las gráficas de las figuras 7.49 y 7.50 se representan los resultados obtenidos. Analizando estas gráficas se comprueba que un tablero de 0,40 m de espesor puede tener una variación de temperatura eficaz de 15°C en 12 horas, mientras que sólo será de unos 7°C si el espesor es de 1,00 ms. En los casos diurnos se observa que la magnitud de la variación es aproximadamente el doble que la variación durante una noche fría, debido a que el balance de energías puesto en juego durante el día es aproximadamente el doble que durante la noche (figuras 7.31 y 7.32).

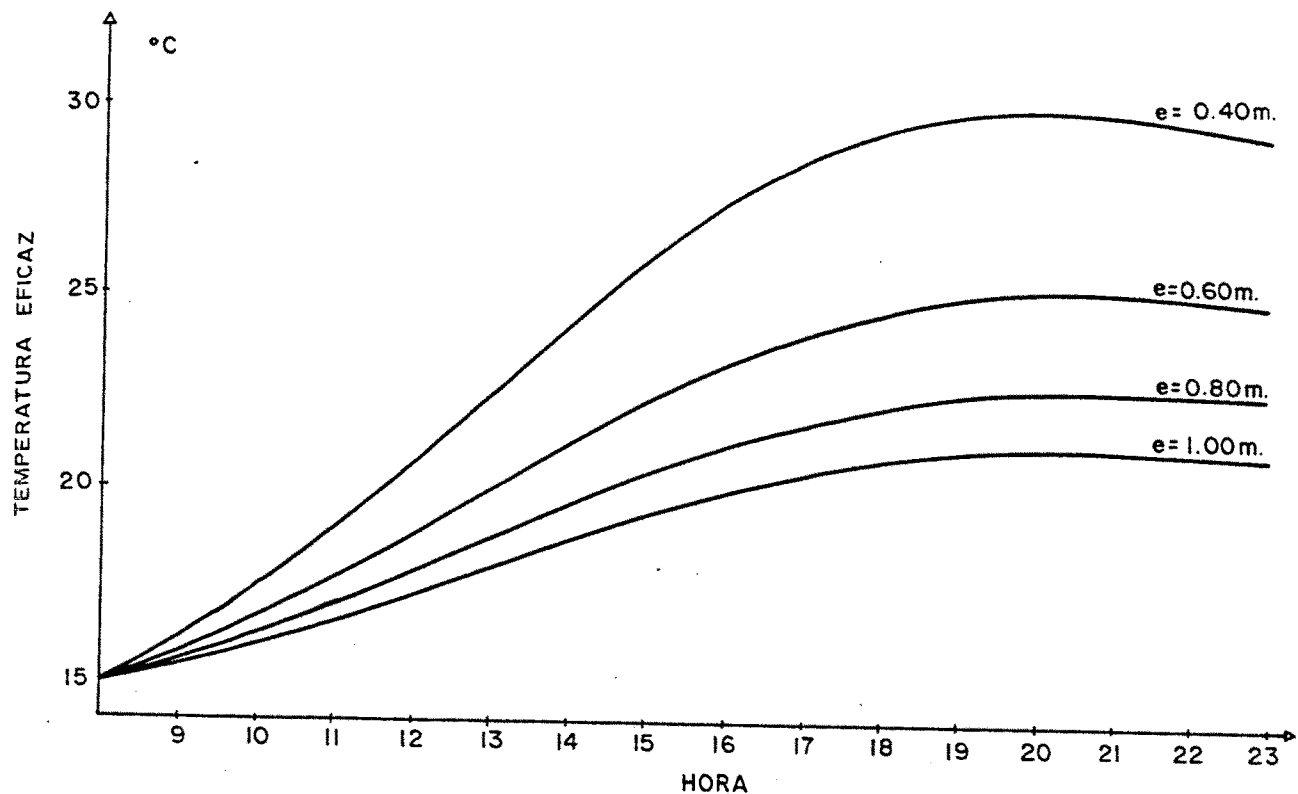


Figura 7.49

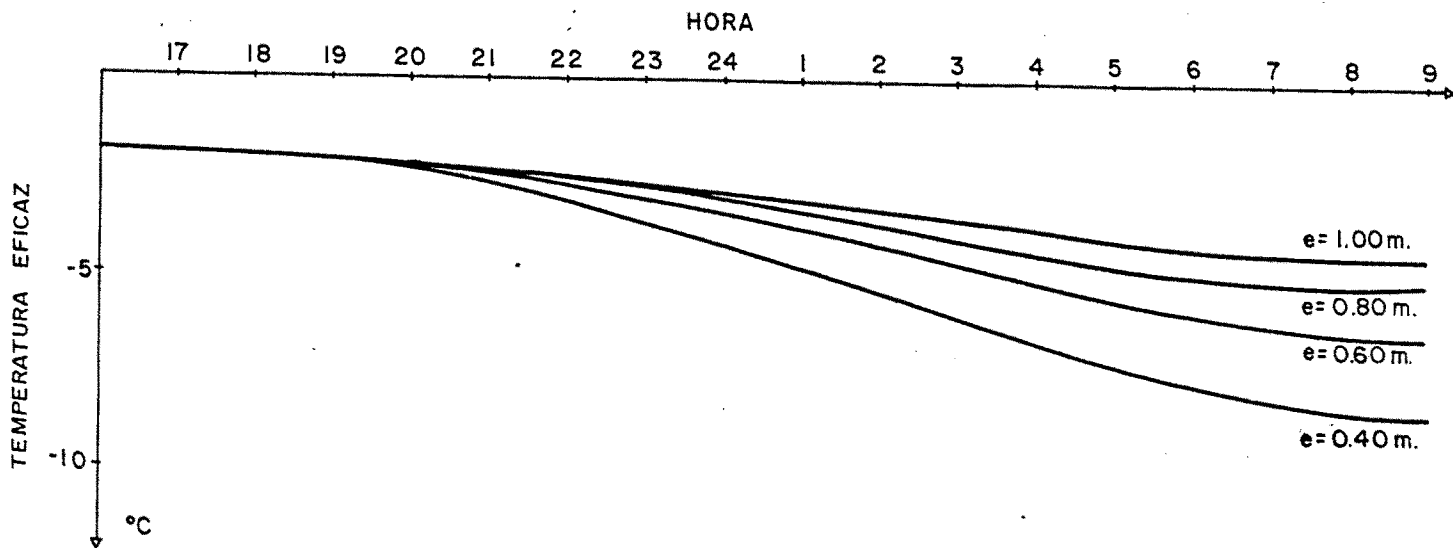


Figura 7.50

7.1.10. ESTUDIO DE LA DILATACION

La temperatura eficaz se ha definido (capítulo 7.1.5.) como la temperatura que gobierna el movimiento longitudinal del puente, por tanto, la variación de temperatura eficaz y la dilatación unitaria del puente están ligadas entre sí mediante una constante de proporcionalidad que es el coeficiente de dilatación del hormigón:

$$\epsilon = \alpha \Delta t \quad (7.11)$$

Los datos del coeficiente dilatación del hormigón se recogen en el capítulo 1.1.1.6.3. y se puede suponer igual a $10^{-5} (\text{°C})^{-1}$.

Por tanto, la máxima dilatación del puente corresponderá a la máxima diferencia de temperaturas eficaces del puente. En el caso de losa de 0,80 m de espesor se han considerado los casos extremos de condiciones meteorológicas en un puente de acuerdo con su situación geográfica (figuras 4.2 y siguientes). Los resultados obtenidos relativos a temperaturas eficaces, se expresan en las figuras 7.49 y 7.50, donde se puede comprobar que las temperaturas eficaces máxima y mínima alcanzadas son: 23°C y -5°C, lo cual significa:

$$\Delta T = 23 - (-5) = 28\text{°C} \quad (7.12)$$

y por tanto, la dilatación será:

$$\epsilon = 10^{-5} \cdot 28 \cdot 10^3 = 0,28 \text{ mm/m.} \quad (7.13)$$

Este dato particular obtenido en la expresión 7.11 es de suma importancia para el diseño de las juntas de dilatación del puente y para el estudio del movimiento del tablero.

Sin embargo, el valor numérico obtenido no es significativo para otro puente situado en otro lugar, y la propuesta que se hace en esta tesis es: no dar un valor de la dilatación o movimiento unitario del tablero para todos los puentes del país, sino que se determine con precisión este valor, dependiendo de su situación, utilizando los mapas de radiación y temperatura del capítulo 4 de esta tesis. Esta propuesta es más útil o aplicable cuanto mayor sea la importancia del puente. Para el resto de espesores de losa se pueden obtener los valores de las dilataciones totales a partir de las figuras 7.49 y 7.50.

Para el caso de precisar la dilatación a lo largo del tiempo se han obtenido las gráficas de las figuras 7.51 y 7.52, en las cuales, la primera se refiere a la evolución de la dilatación del puente en día caluroso de verano suponiendo que en el origen a las 8,00 horas la dilatación es nula. La segunda se refiere a una noche fría de invierno con

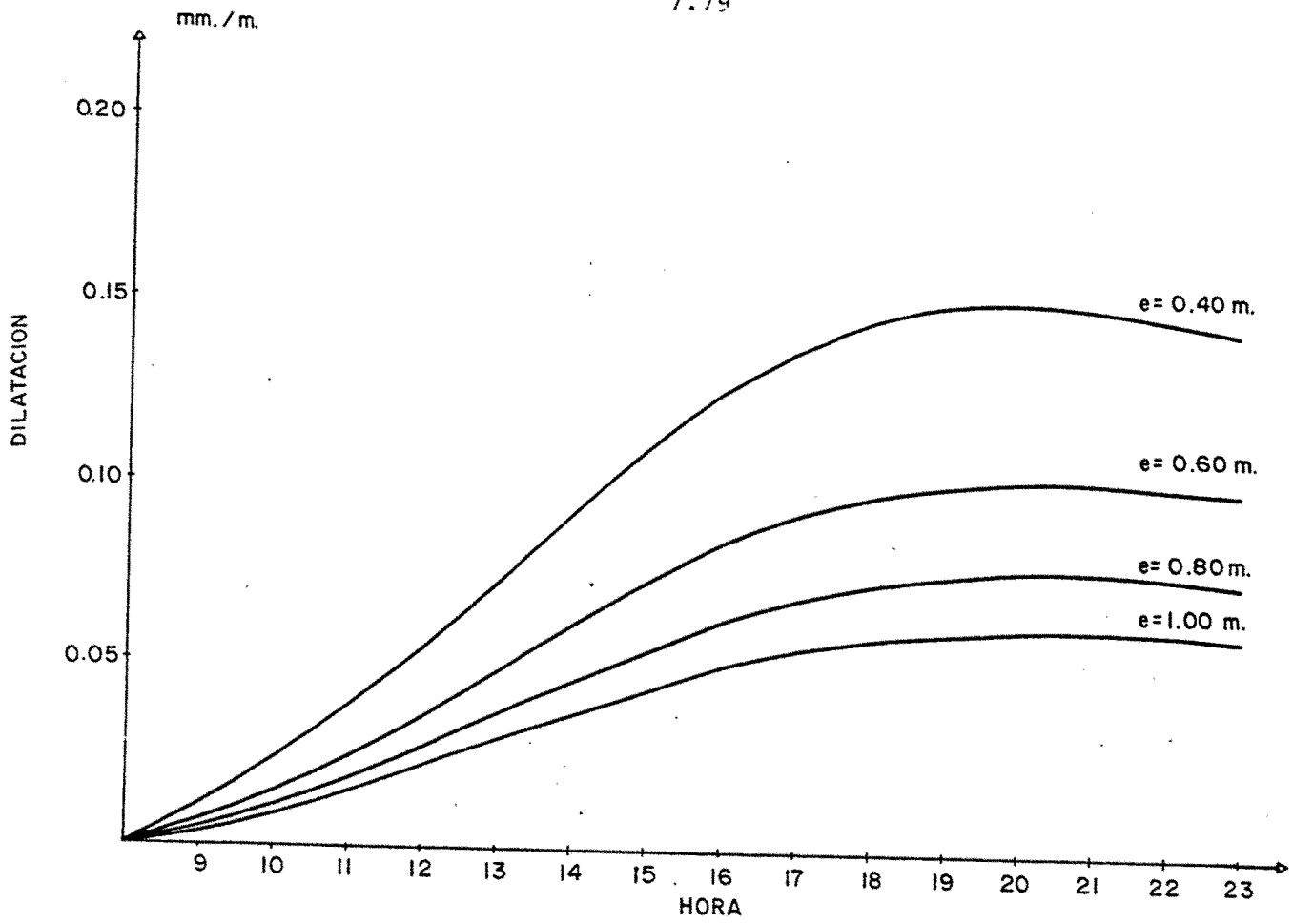


Figura 7.51

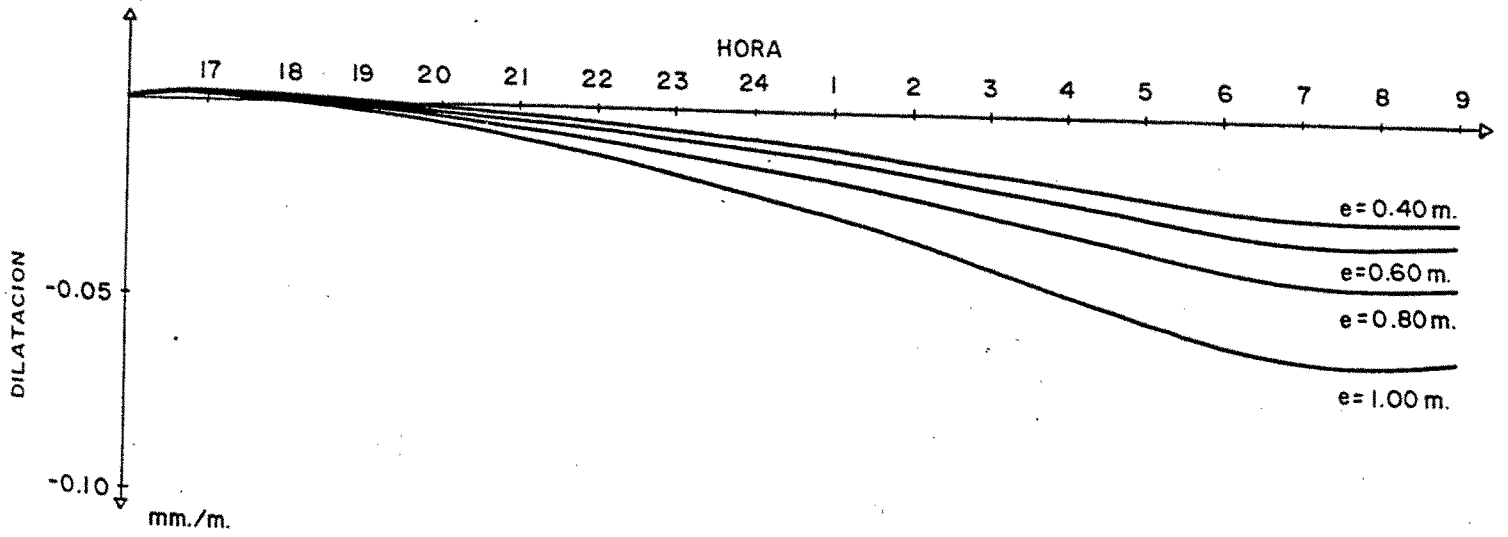


Figura 7.52

origen a las 16 horas y la evolución hasta la mañana siguiente. Estas curvas son similares a las gráficas de las figuras 7.49 y 7.50 (ya que están ligadas por el coeficiente de dilatación), y en todas ellas se aprecia la hora en que se consigue el máximo de dilatación. La máxima dilatación se produce en todos los casos alrededor de las 7 horas de la tarde en verano, y la mínima en invierno hacia las 8 horas de la mañana.

Este último es una confirmación de que las 8,00 horas es la ideal como hora inicial para efectuar el cálculo del estado térmico del puente, pues tiene el mínimo de temperatura eficaz y además el gradiente también es mínimo.

7.1.11. INFLUENCIA DE LA CURVATURA

La curvatura que adquiere un puente por causas térmicas sólo interesa en el caso de puentes hiperestáticos, puesto que en el caso de puente isostático la curvatura de la pieza se traduce en un movimiento libre del tablero con modificación de su flecha pero sin que resulte de ello ninguna tensión si se exceptúa los esfuerzos de autotensión térmica.

Para el caso de puente hiperestático el dato de la curvatura de cada tramo supuesto isostático es necesario para poder deducir los momentos de continuidad en cada apoyo intermedio.

En las figuras 7.53 y 7.54 se representa la evolución en el tiempo, de la curvatura de un puente en el caso de día caluroso de verano y noche fría de invierno para los diferentes espesores. El mayor valor de la curvatura tanto positiva como negativa (se ha considerado curvatura positiva en el caso de la deformada con el centro de curvatura en la parte inferior), se produce para los espesores de losa más pequeños.

Una representación gráfica de la evolución de la curvatura en el tiempo se observa en las figuras 7.55 y 7.56. En ellas se muestra la evolución de la sección plana de la pieza debido a las cargas térmicas, y por tanto, conocido el canto de la pieza (en las figuras el canto de la sección vale 0,80 m), se puede conocer su curvatura.

La figura 7.57 muestra una gráfica de las máximas curvaturas (positiva o negativa) obtenidas en condiciones extremas para diversos espesores de losa. Se demuestra la fuerte dependencia que tiene del espesor de la pieza y como disminuye automáticamente con el crecimiento del canto de la losa.

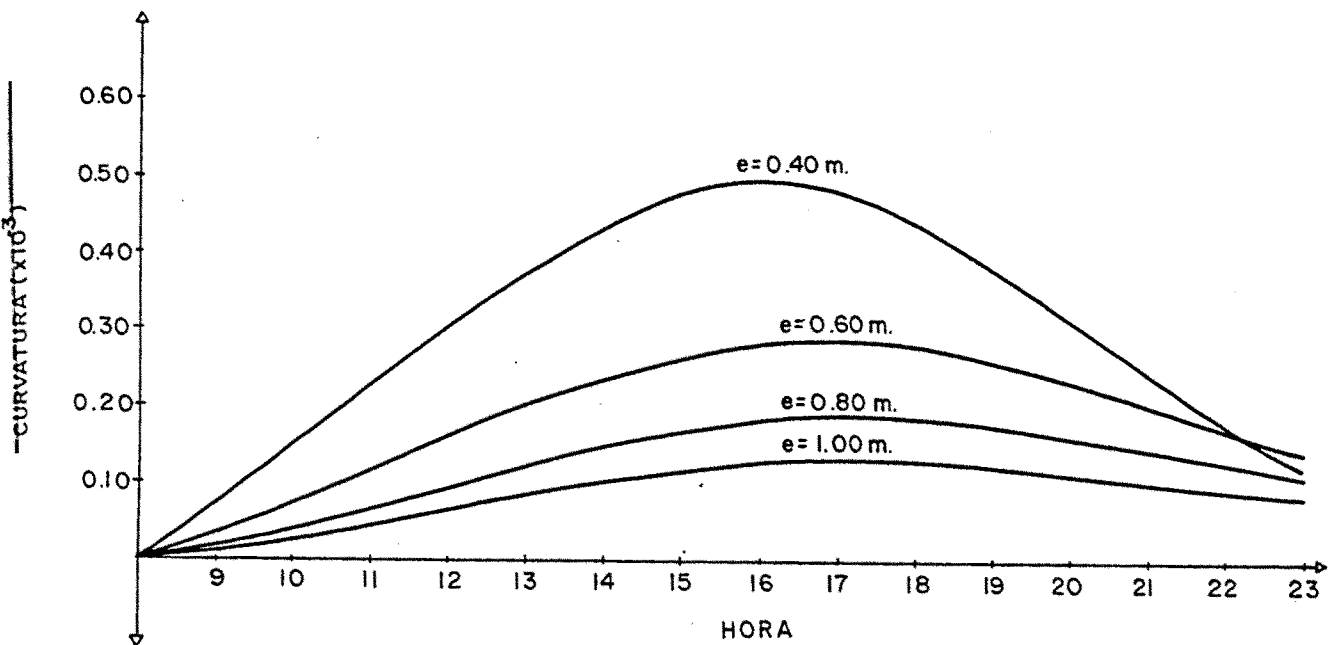


Figura 7.53

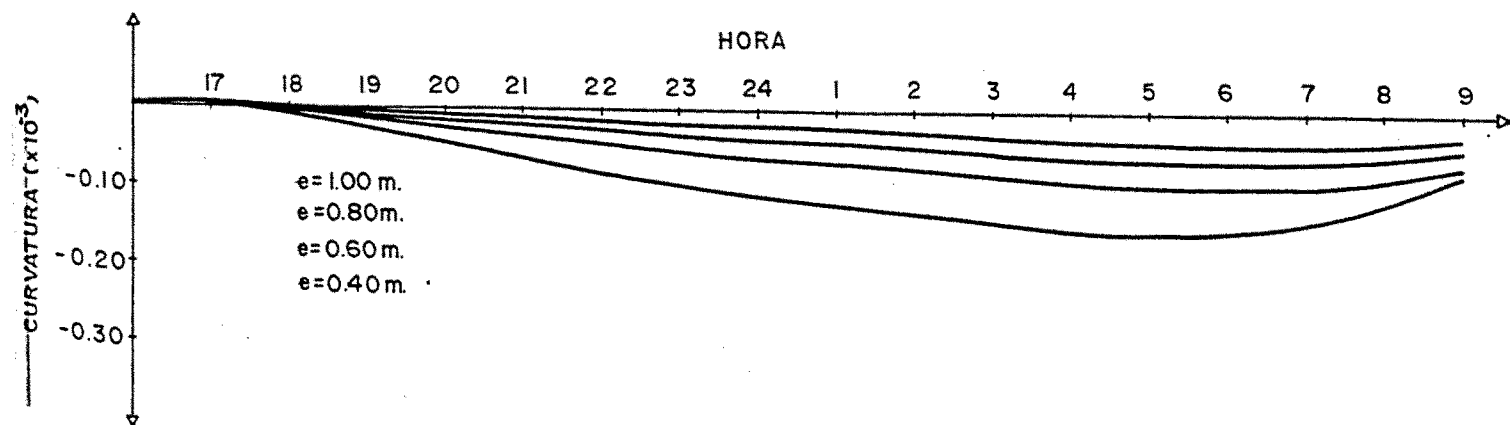


Figura 7.54

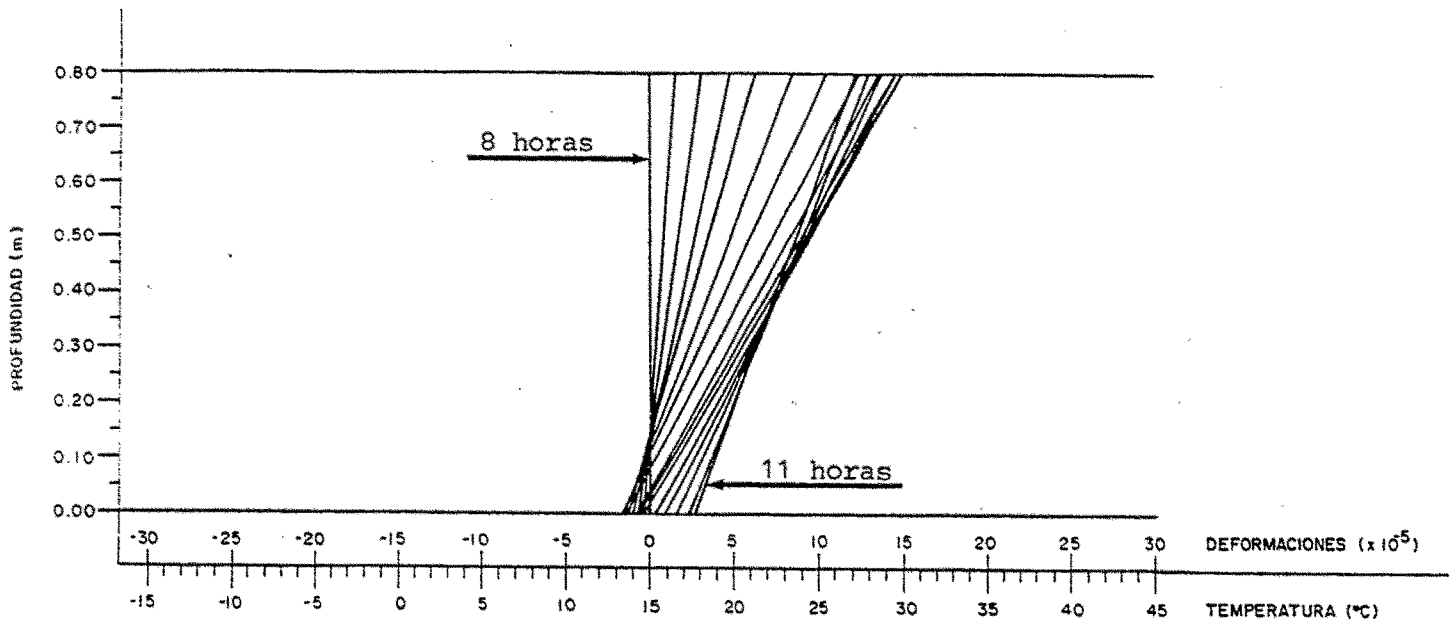


Figura 7.55

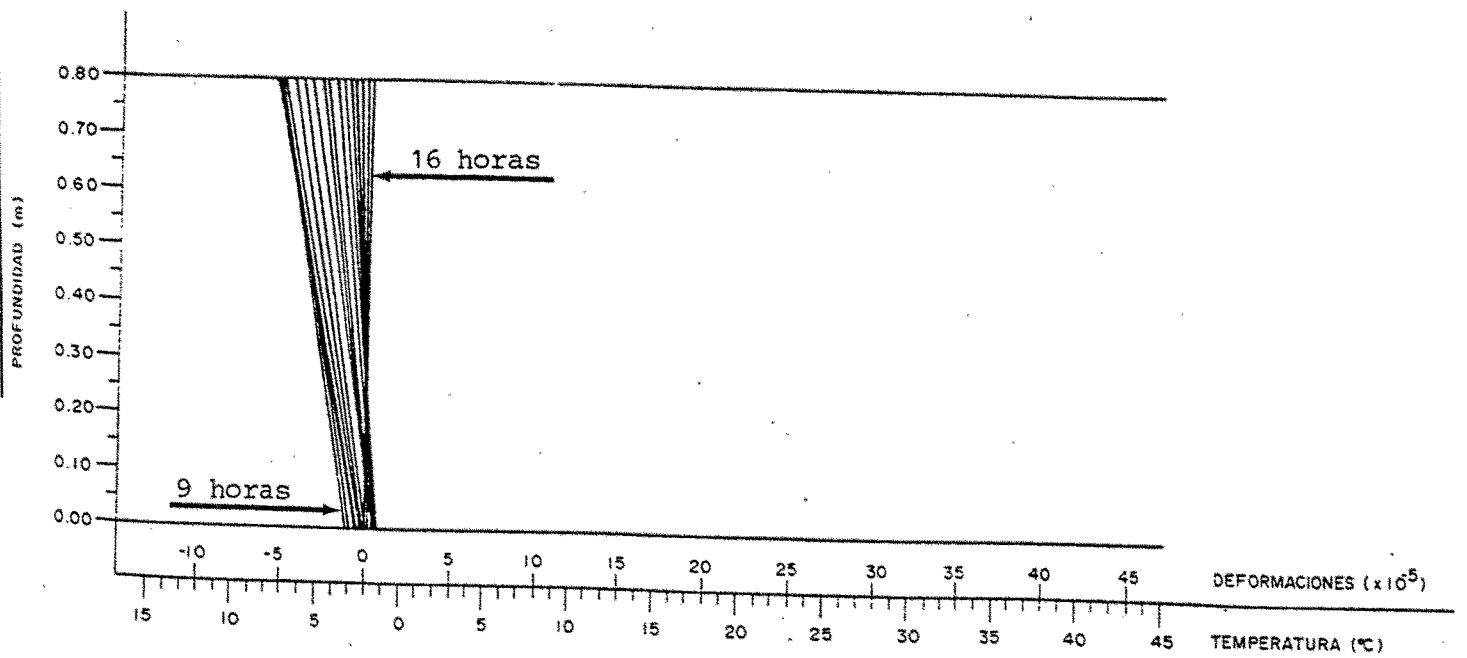


Figura 7.56

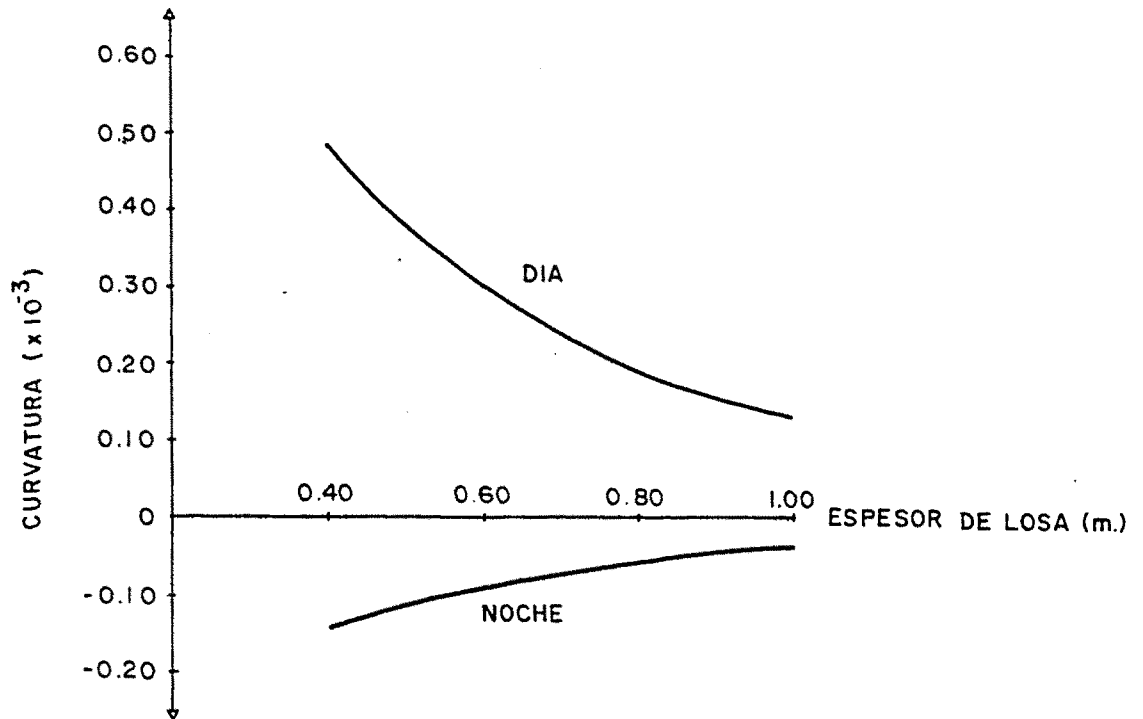


Figura 7.57

7.1.12. ESTADO DE AUTOTENSION

El estado de autotensión en un puente debido a efectos térmicos ya se definió en el capítulo 2.3 de la presente tesis. Mediante el programa BRIDGE se han obtenido, los valores de las tensiones debidas a autotensión, al igual que en todos los demás casos, para un día caluroso de verano y una noche fría de invierno.

Los resultados de las tensiones máximas en cada instante se muestran en las figuras 7.58 y 7.59. Para el caso de la figura 7.58 correspondiente a un día caluroso, las tensiones máximas positivas (compresión) están divididas en dos tramos, ya que el primer tramo corresponde a las tensiones

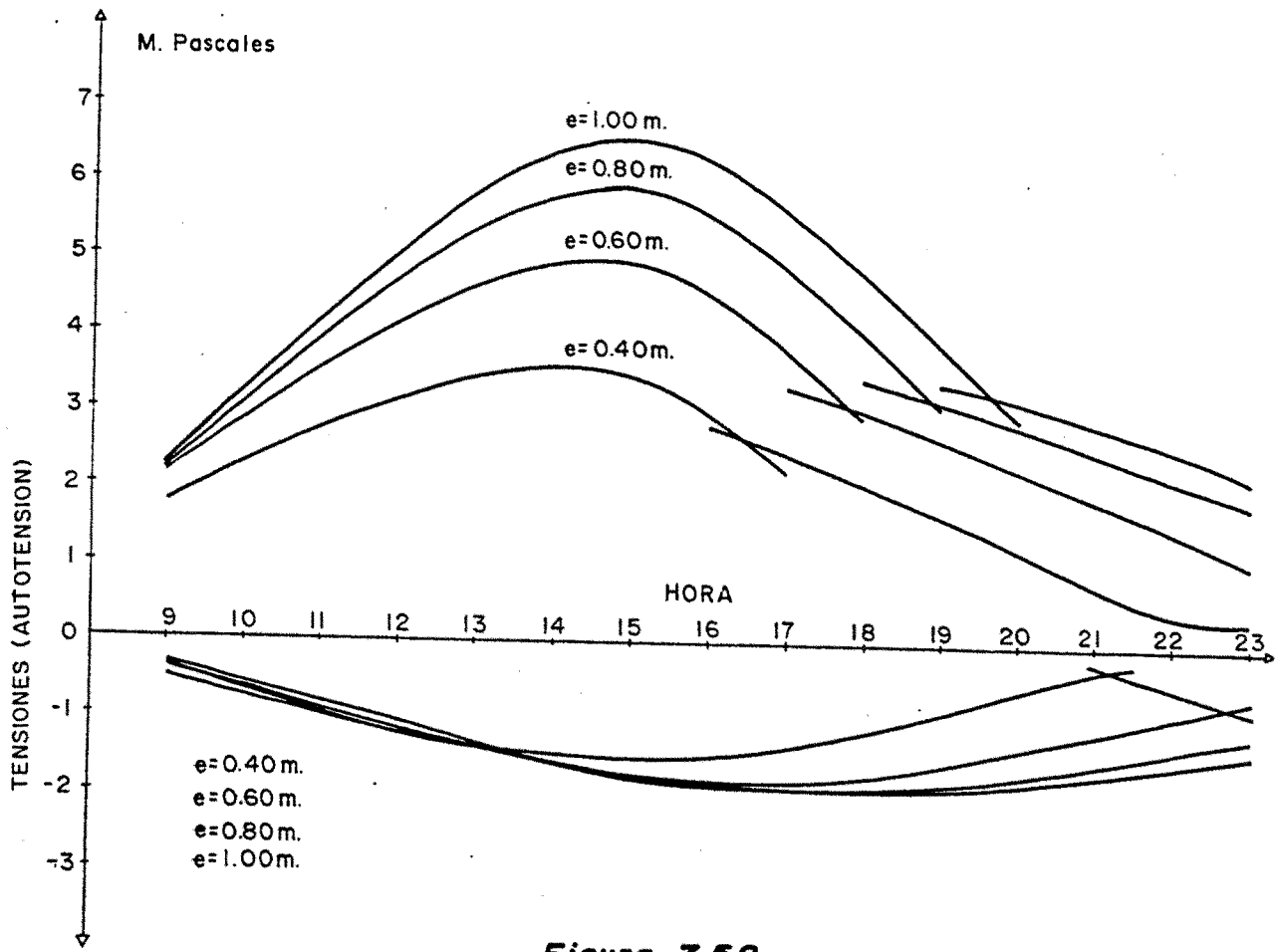


Figura 7.58

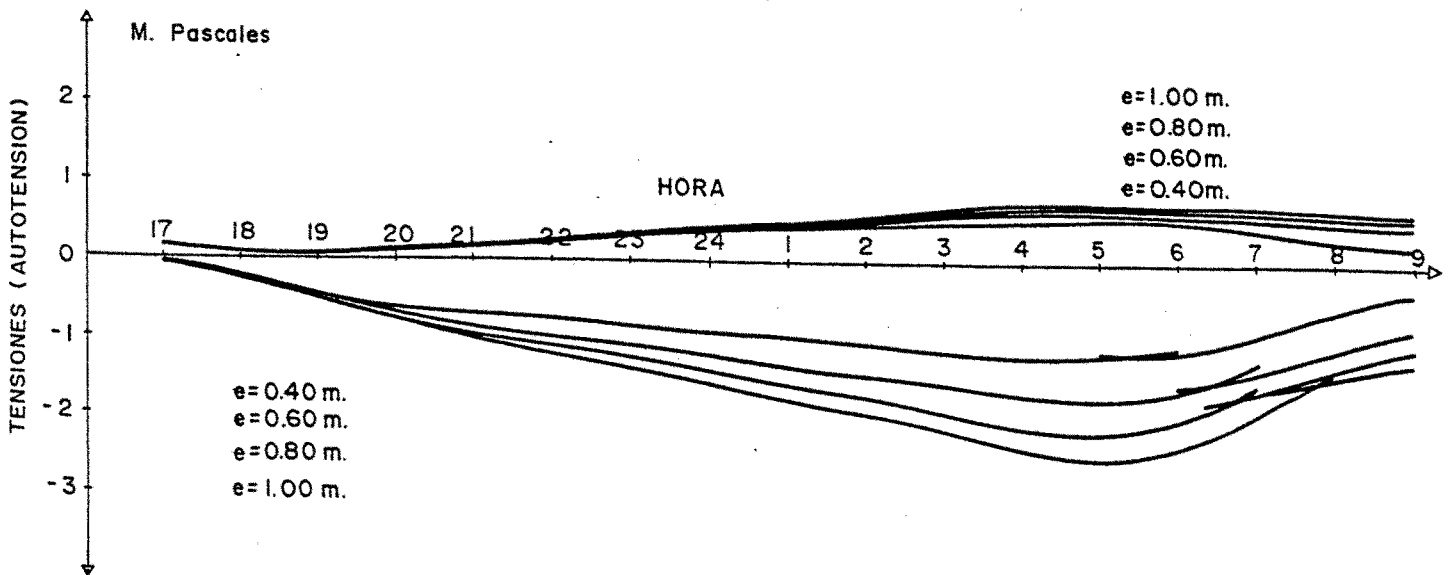


Figura 7.59

en el borde superior de la losa y la segunda parte al borde inferior. Este cambio de la situación del punto de máximo esfuerzo se debe a la propia variación de la sección plana deformada (figuras 7.55 y 7.56). Igual sucede con las máximas tracciones en el caso de noche fría (figura 7.59), en la cual se observa, que a partir de una determinada hora, la posición de la máxima tracción, pasa del borde superior al borde inferior de la losa.

Es importante considerar que las tensiones en valor absoluto (es decir, tanto de tracción como de compresión) aumentan con el espesor de la losa, y en las figuras 7.60 y 7.61 se muestran las máximas tensiones (tanto de tracción como de compresión) en función del espesor de la losa en los dos casos de condiciones ambientales extremas.

El análisis de estos resultados es importante, ya que, en el caso de una losa de 1,00 metros de espesor puede dar unas compresiones adicionales en la parte superior de la losa superiores a 6,0 Megapascales que es una cifra muy importante, aunque localizada en un espesor muy pequeño.

Los valores negativos de estas tensiones también son importantes (próximas a 2,0 Megapascales) que en el caso de un puente pretensado actúa como descompresión en la zona afectada. En el caso de puente de hormigón armado estos valores pueden llegar a fisurar el hormigón, con lo cual desaparecerían los esfuerzos de autotensión.

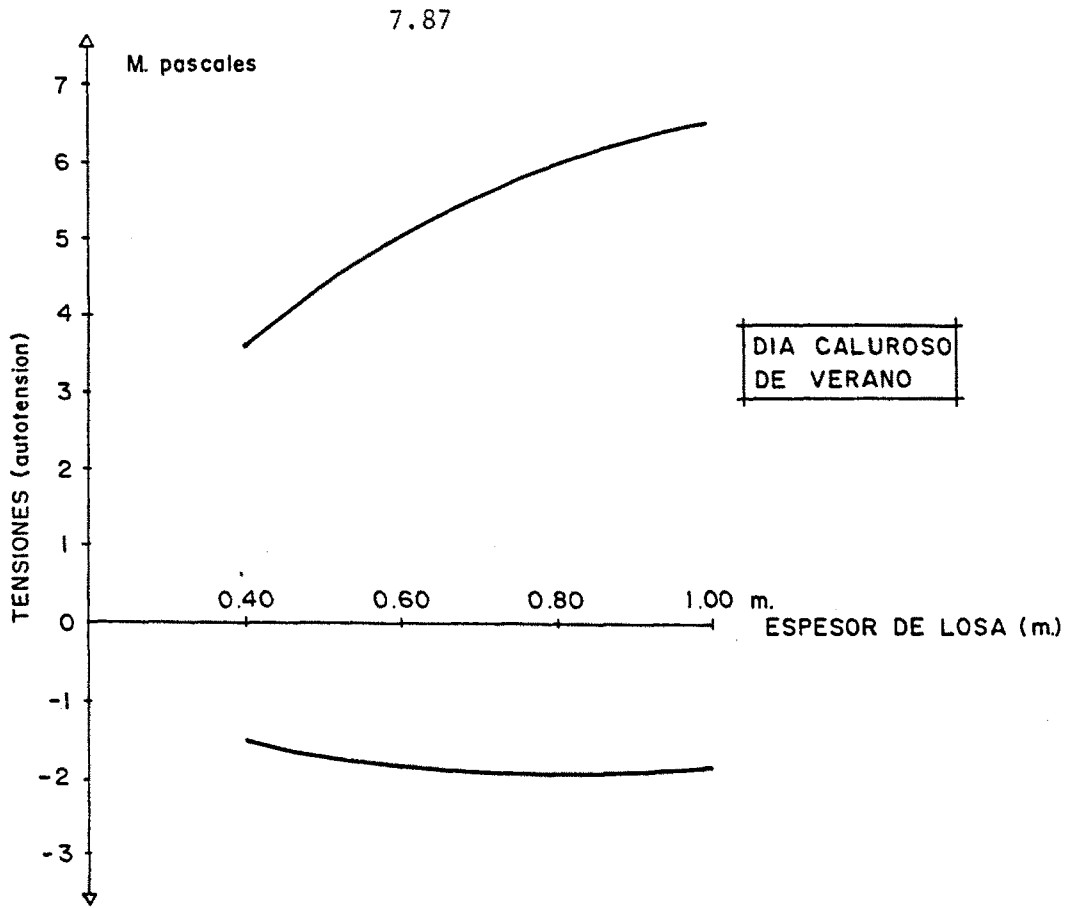


Figura 7.60

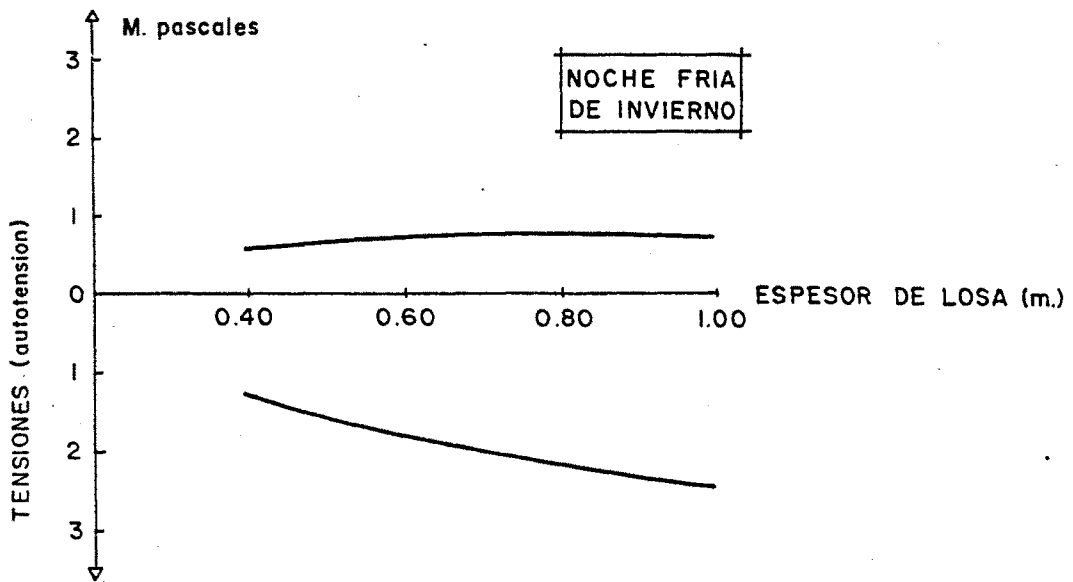


Figura 7.61

7.2. ESTUDIO BIDIMENSIONAL DEL ESTADO TERMICO DE TABLEROS DE PUENTE

7.2.1. INTRODUCCION

Según se comentó en el capítulo 2.2 la ecuación general de la conducción del calor (fórmula 2.1) tiene gran dificultad de resolución, por lo que es preciso recurrir en cada momento, a una serie de simplificaciones que puedan ser aceptables en el caso considerado. Si se estudia un problema bidimensional y se supone que no existe generación interna de calor, por ejemplo calor de fraguado, la ecuación 2.2 puede simplificarse de la forma:

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} = \frac{\rho C}{k} \frac{\partial t}{\partial \tau} \quad (7.13)$$

La aplicación de la fórmula (7.13) tiene sentido siempre que efectivamente el flujo de calor que se produzca sea bidimensional. En concreto en esta tesis, para ser aplicación a secciones de tablero de puente, será útil cuando la geometría del tablero sea tal que el flujo de calor que se produzca tenga las dos componentes espaciales "x" e "y".

Según este criterio, en esta tesis, se efectúa una clasificación de los tableros de puente (capítulo 6), atendiendo a su comportamiento térmico que vendrá definido por sus condi-

ciones de contorno, es decir, por su geometría. En el capítulo 6 se dividen los tableros de puente (figura 6.1), y según los criterios anteriores, en cuatro apartados:

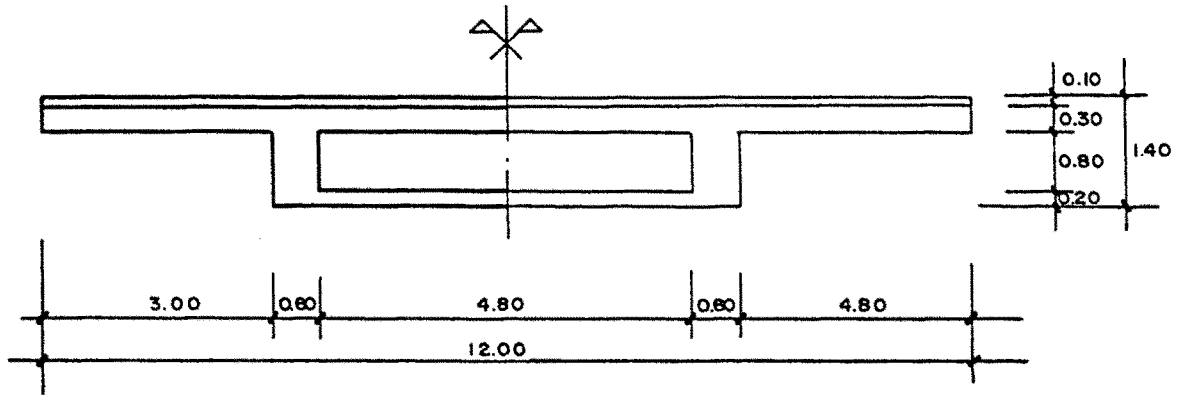
- Puentes losa, considerando los casos de diferentes espesores por su distinto rango de comportamiento. Por su propia geometría, en este tipo de puentes puede considerarse flujo unidimensional con suficiente precisión, según se comprobará en el apartado 7.3.1 de este mismo capítulo.
- Puentes de sección cajón, tratados en el cálculo unidimensional como un flujo vertical con el aire interior considerado a través de un coeficiente de convección entre superficies (capítulo 1.1.3.3.). En el presente capítulo se tratará como un caso de flujo bidimensional con los coeficientes de convección definidos según la teoría de la convección térmica (capítulo 1.1.3.).
- Puentes de sección multicelular. Se considerará, en general, que los aligeramientos de la sección multicelular son rectangulares, y el flujo debido a las diferentes propiedades térmicas del aire y del hormigón se comportará como bidimensional, por lo que será preciso un tratamiento bidimensional de su comportamiento térmico.

-Puentes de vigas. Según se indicó en el capítulo 6, los pequeños espesores de hormigón de este tipo de vigas, y su elevada superficie en contacto con el aire exterior hace que su comportamiento térmico dependa de la zona próxima a los puntos considerados y sea independiente del resto de la viga, de esta forma en las zonas en las cuales la geometría sea vertical, como por ejemplo en las almas, el flujo de calor que deberá ser normal a la superficie será horizontal, mientras que en aquellas zonas con superficies horizontales, como la losa o el tablón el flujo será vertical; por tanto, se hace imprescindible un tratamiento bidimensional del problema como el efectuado en el presente capítulo.

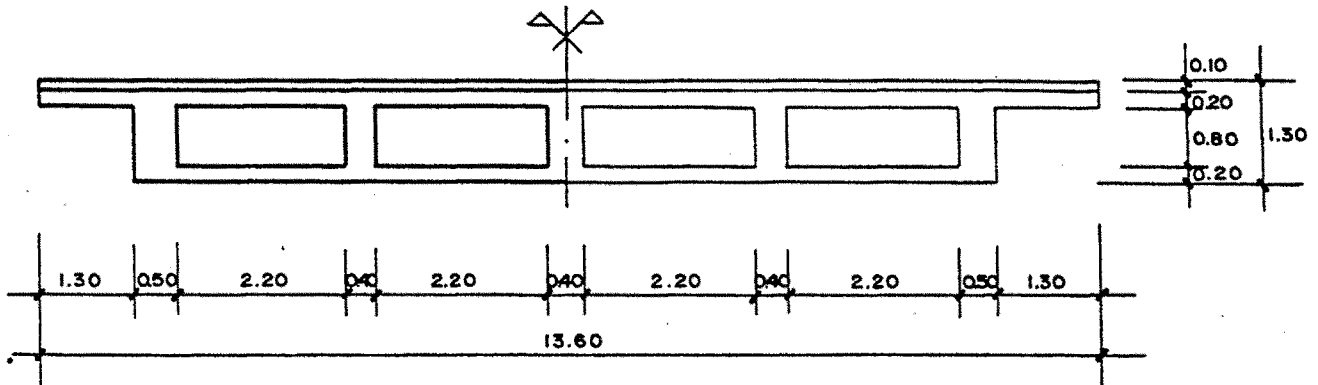
7.2.2. ESTADO TERMICO DE TABLEROS DE PUENTE

El análisis bidimensional considerado en el apartado 7.2.1 se ha resuelto mediante un programa de computador de transmisión de calor en dos dimensiones titulado CAL2D especialmente diseñado para su aplicación a tableros de puente, en especial en lo referente a su entrada de datos de una forma cómoda y rápida.

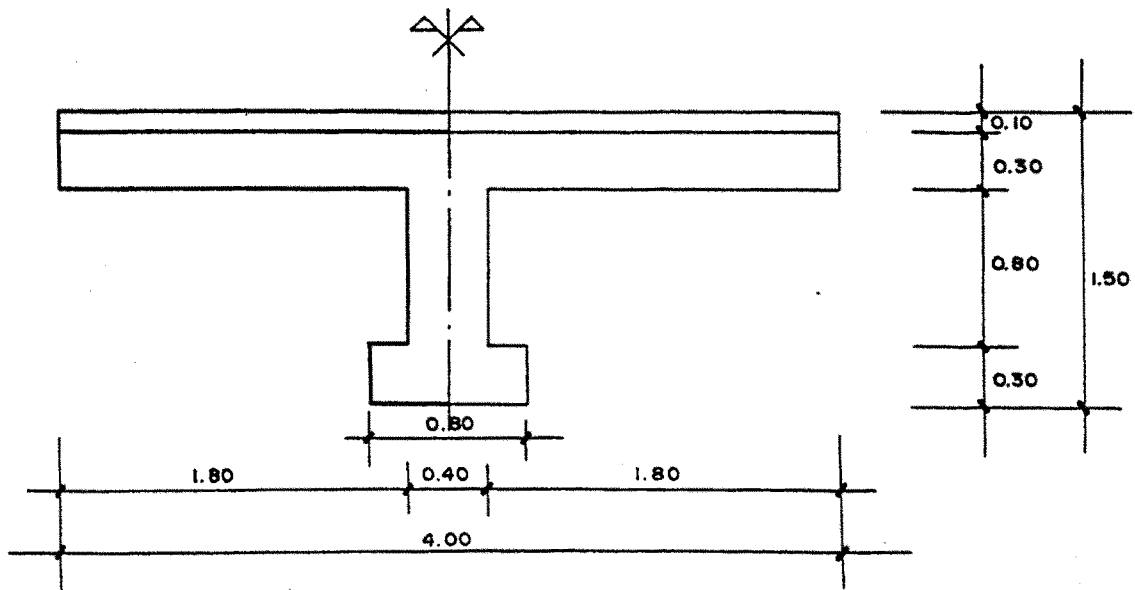
El programa CAL2D tiene diversas opciones de salida de tipo de tablas numéricas por impresora, o bien la creación de un fichero de resultados para su elaboración por otro programa de DISEÑO GRAFICO creado en el Departamento de Ciencias Aplica



TABLERO DE SECCION CAJON
Escala 1/100



TABLERO DE SECCION MULTICELULAR
Escala 1/100



TABLERO DE VIGAS
Escala 1/40

Figura 7.62

das a la Ingeniería de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Santander.

En el presente capítulo se utilizarán los dos tipos de resultados del programa. El programa de diseño gráfico permite obtener la representación gráfica de una perspectiva axonométrica de la superficie de temperaturas del puente $t = t(x,y)$ desde cualquier posición del espacio. Los resultados se muestran en las figuras 7.63 y siguientes.

Estas figuras permiten obtener una visión inmediata del campo de temperaturas en un puente y en el aire de alrededor. Debe considerarse, que cada nudo de la malla dibujada, es el centro del área o retícula cuyas propiedades térmicas se adjudican al punto central (figura 9,9) y que si bien el diagrama dibujado es perfectamente válido, debe considerarse con especial cuidado los puntos del contorno para definir con detalle el diagrama de temperaturas, teniendo en cuenta que en esta zona la transmisión de calor se efectúa por convección y el diagrama de temperaturas sufre un cambio brusco en la superficie o en el contacto sólido-fluido (figuras 1.20 y 7.89).

De acuerdo con la clasificación térmica de tableros efectuada en el capítulo 6 y descrita en el punto anterior, deberán tratarse los casos de puente de sección cajón figuras (7.63 a 7.66 y 7.75 a 7.78) puente de sección multicelular figu

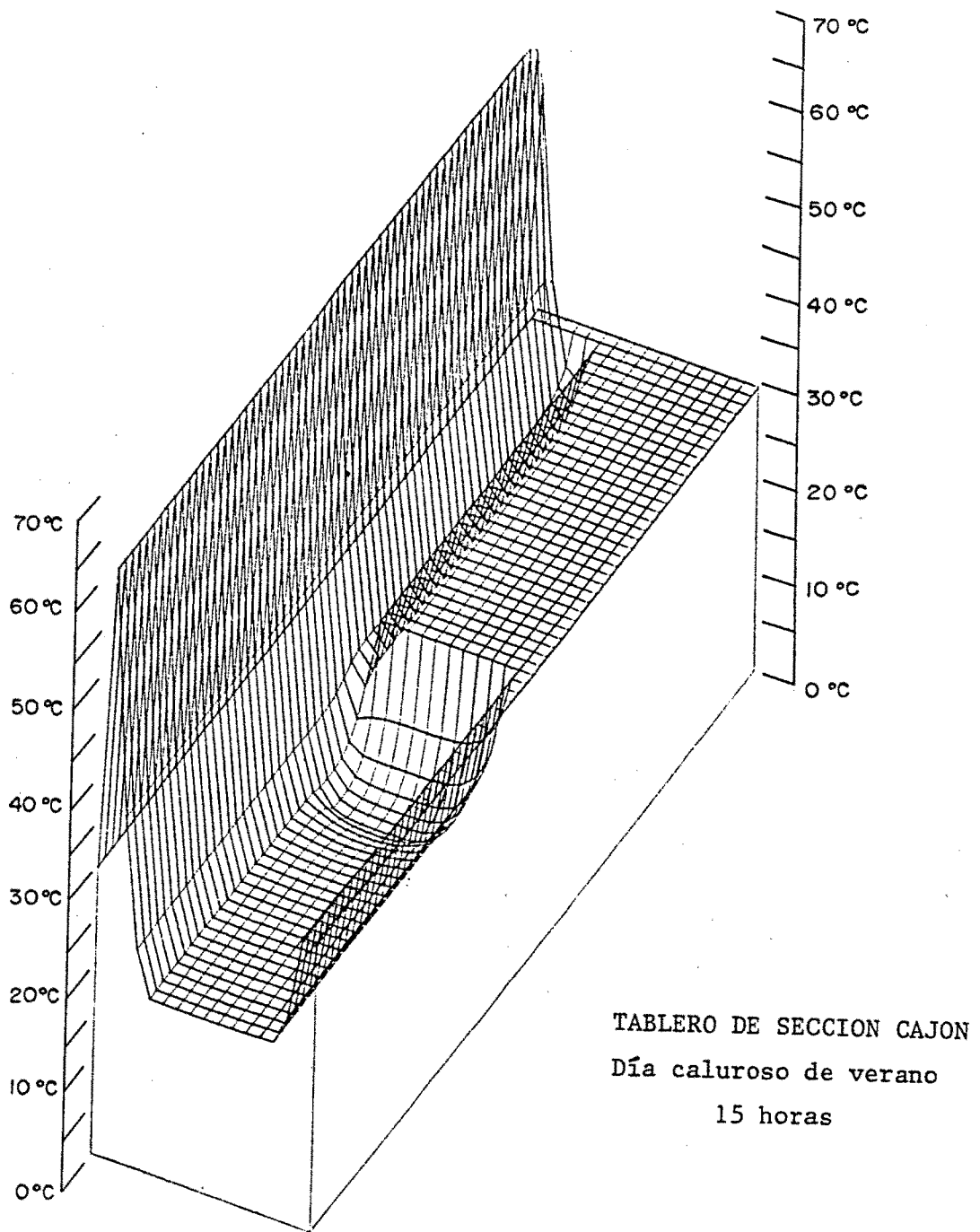


FIG. 7.63

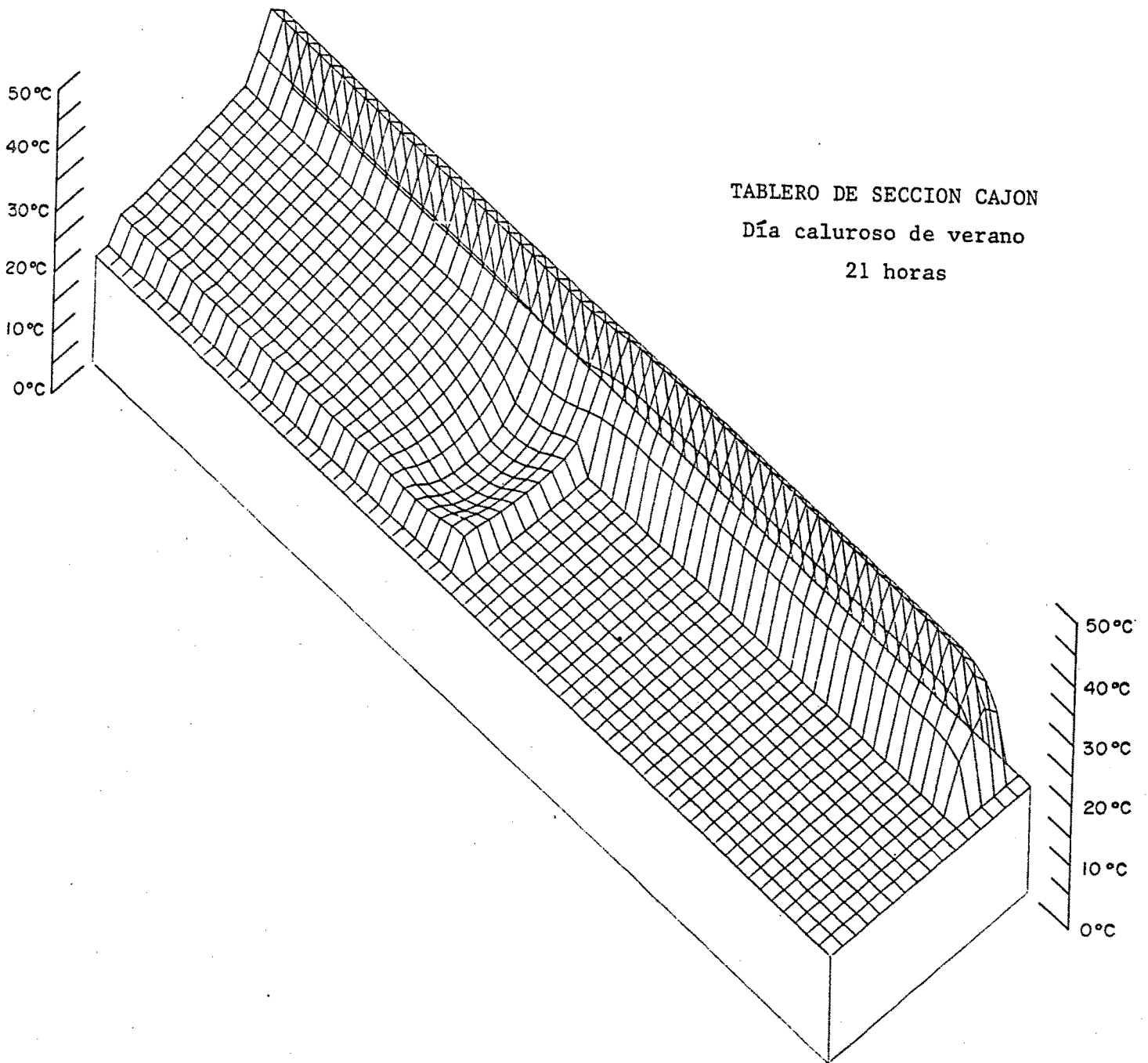


FIG. 7.64

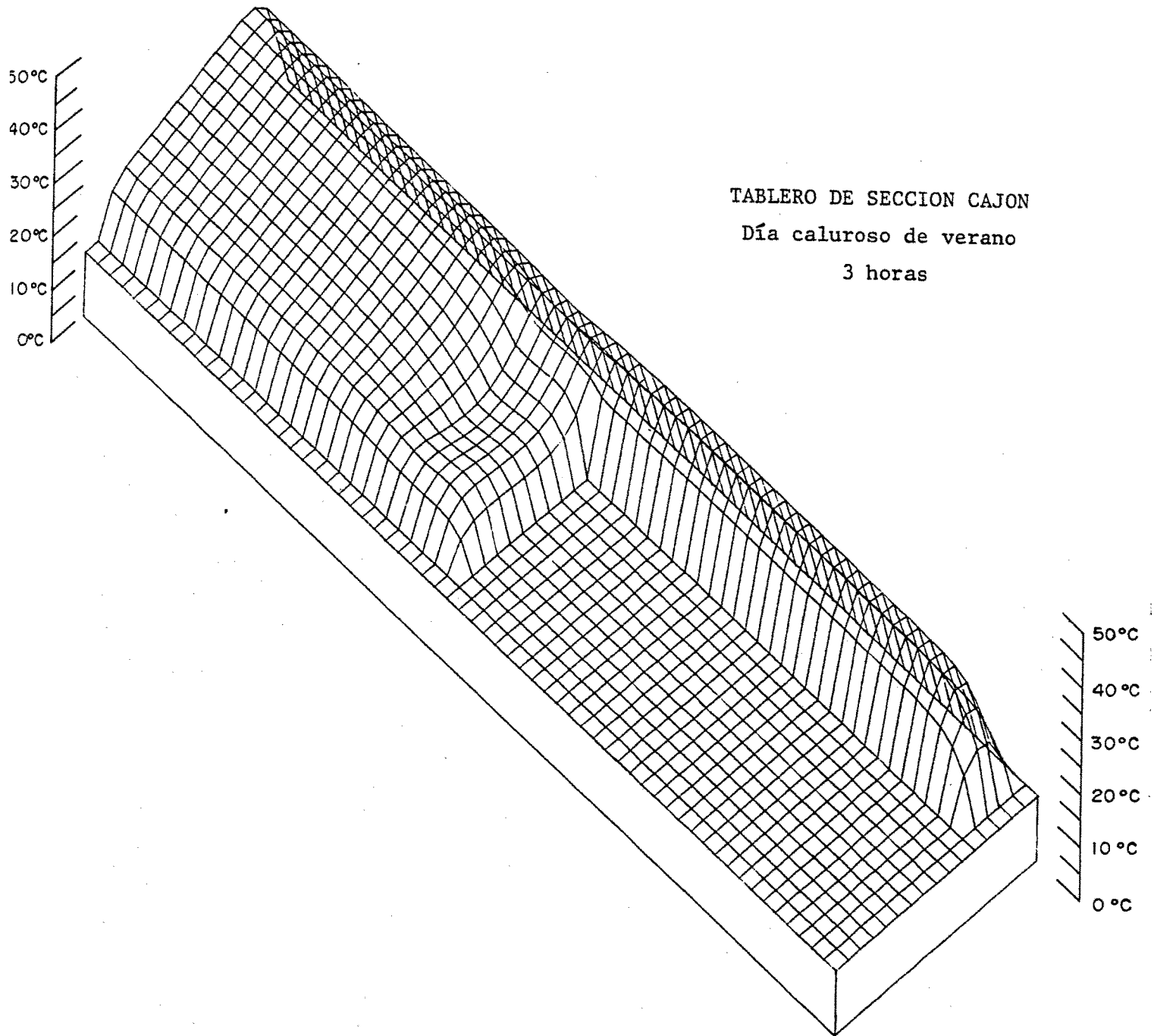
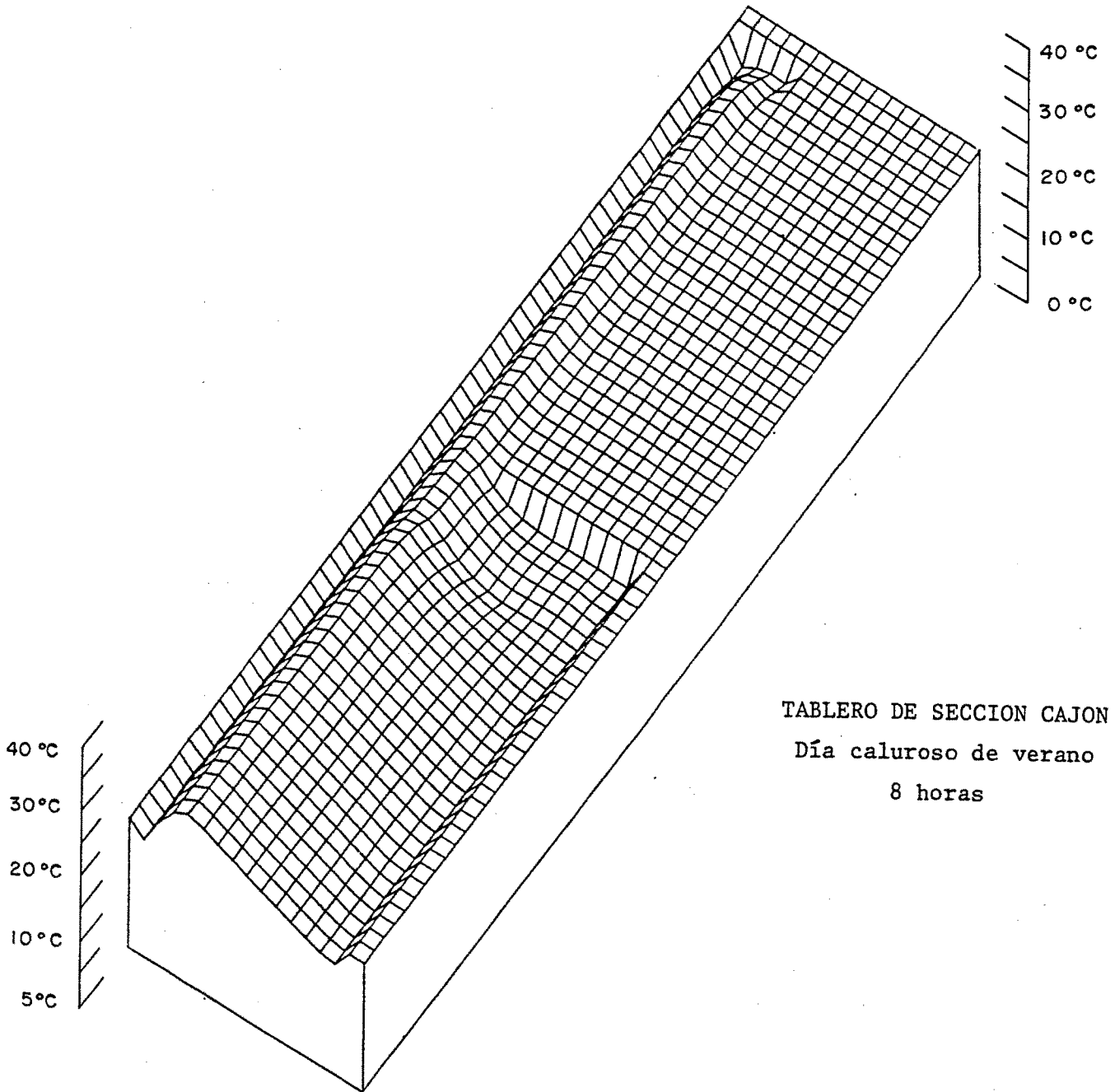


FIG. 7.65



TABLERO DE SECCION CAJON
Día caluroso de verano
8 horas

FIG. 7.66

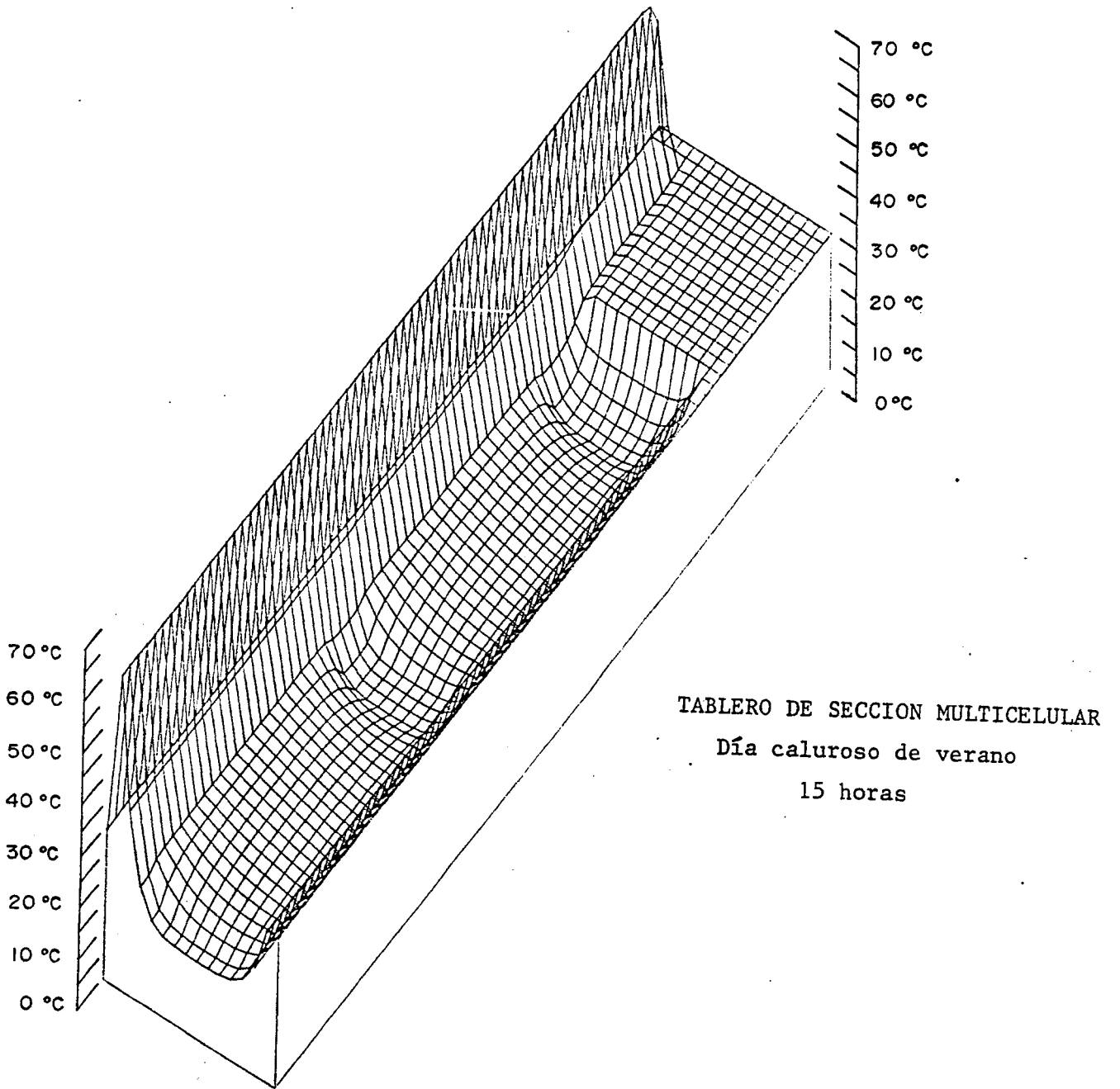


FIG. 7.67

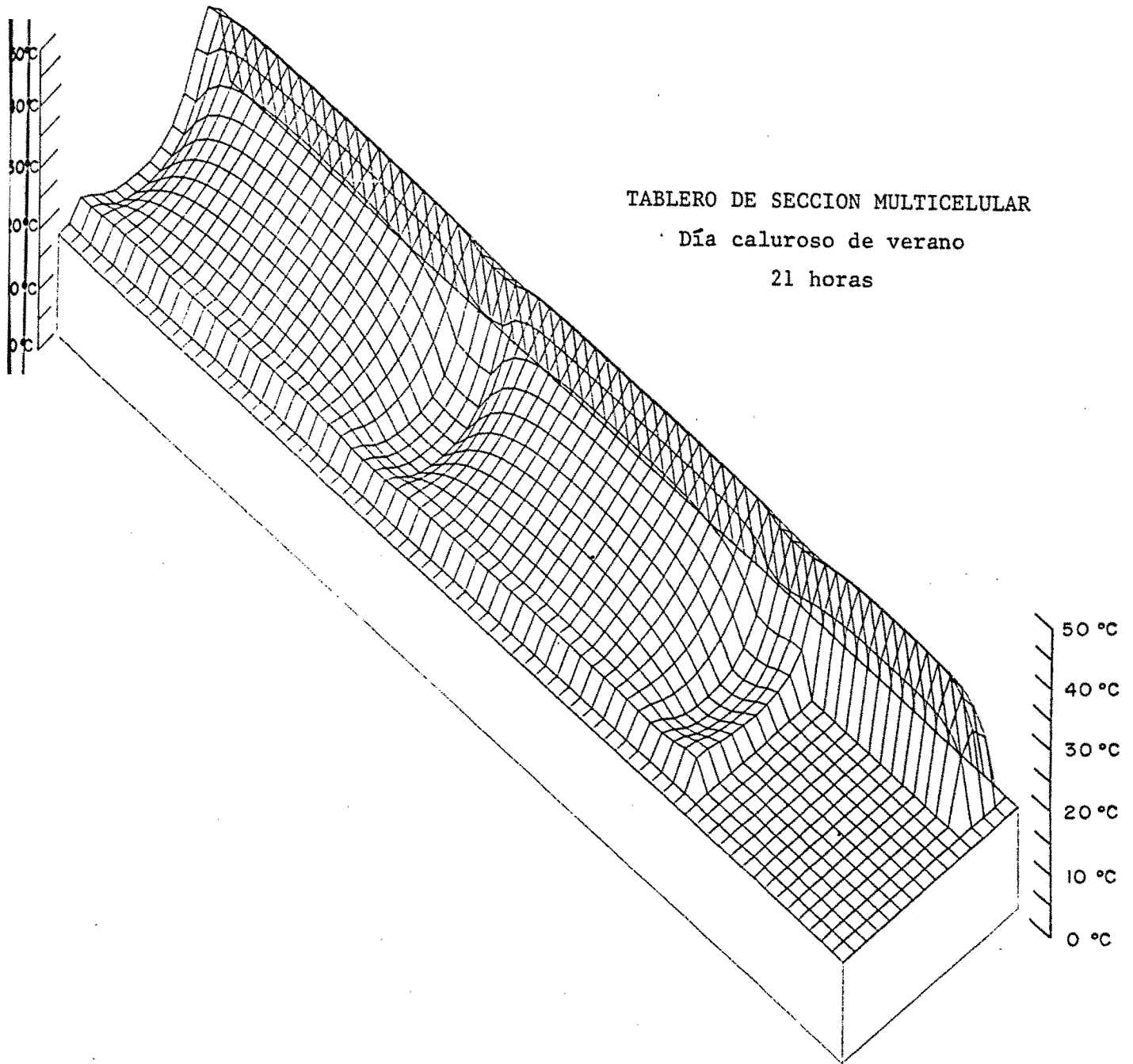


FIG. 7.68

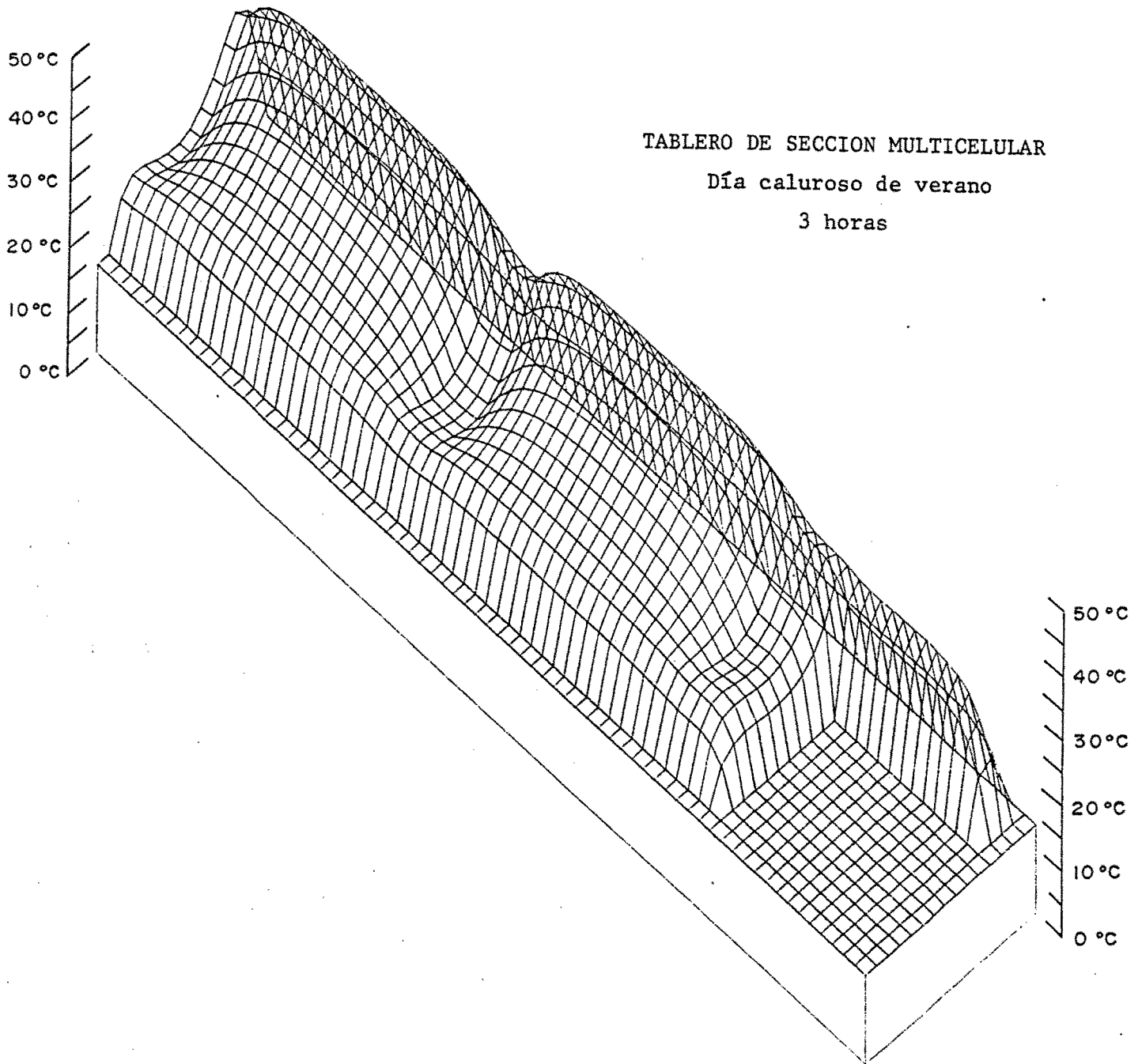


FIG. 7.69

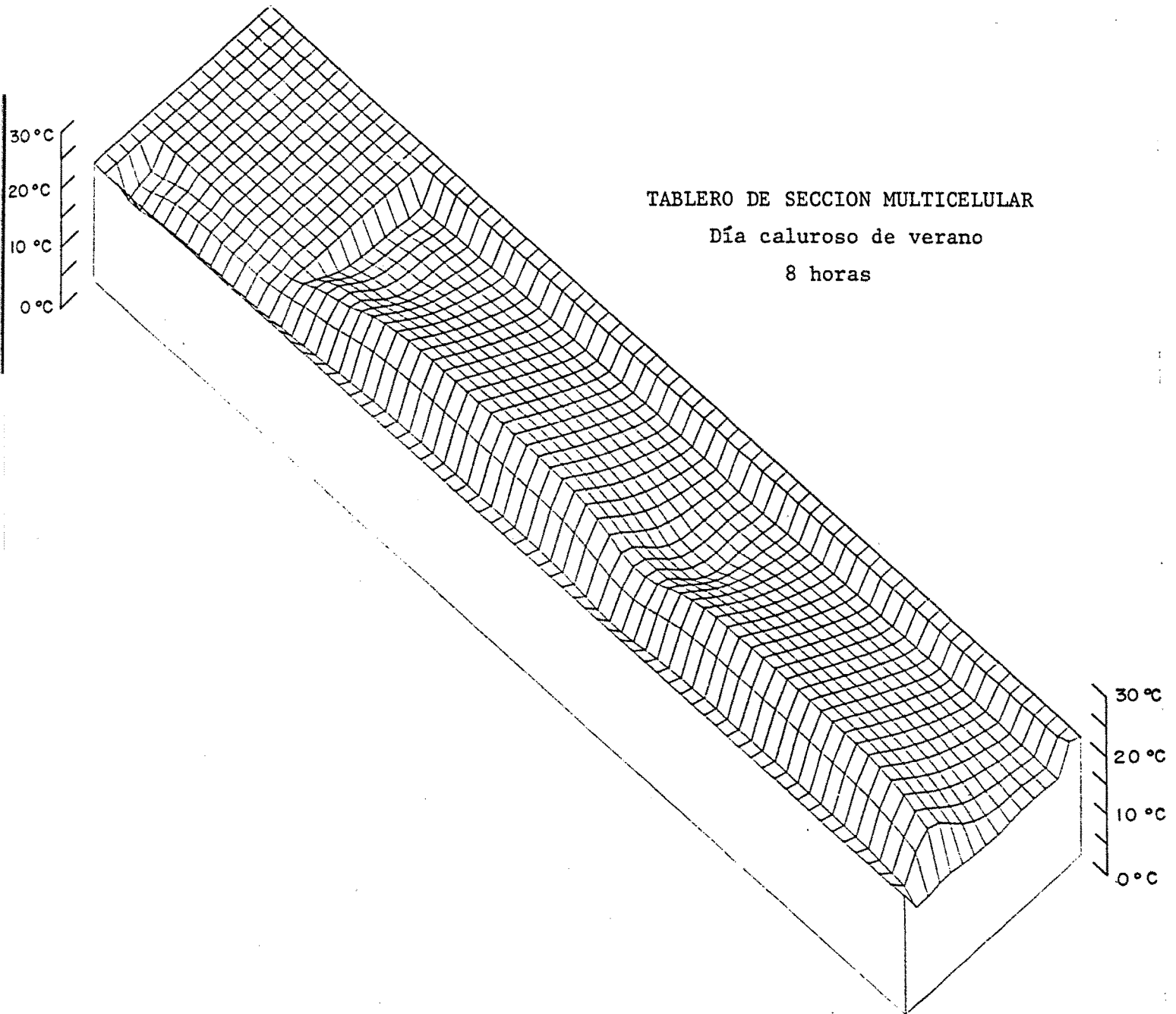


FIG. 7.70

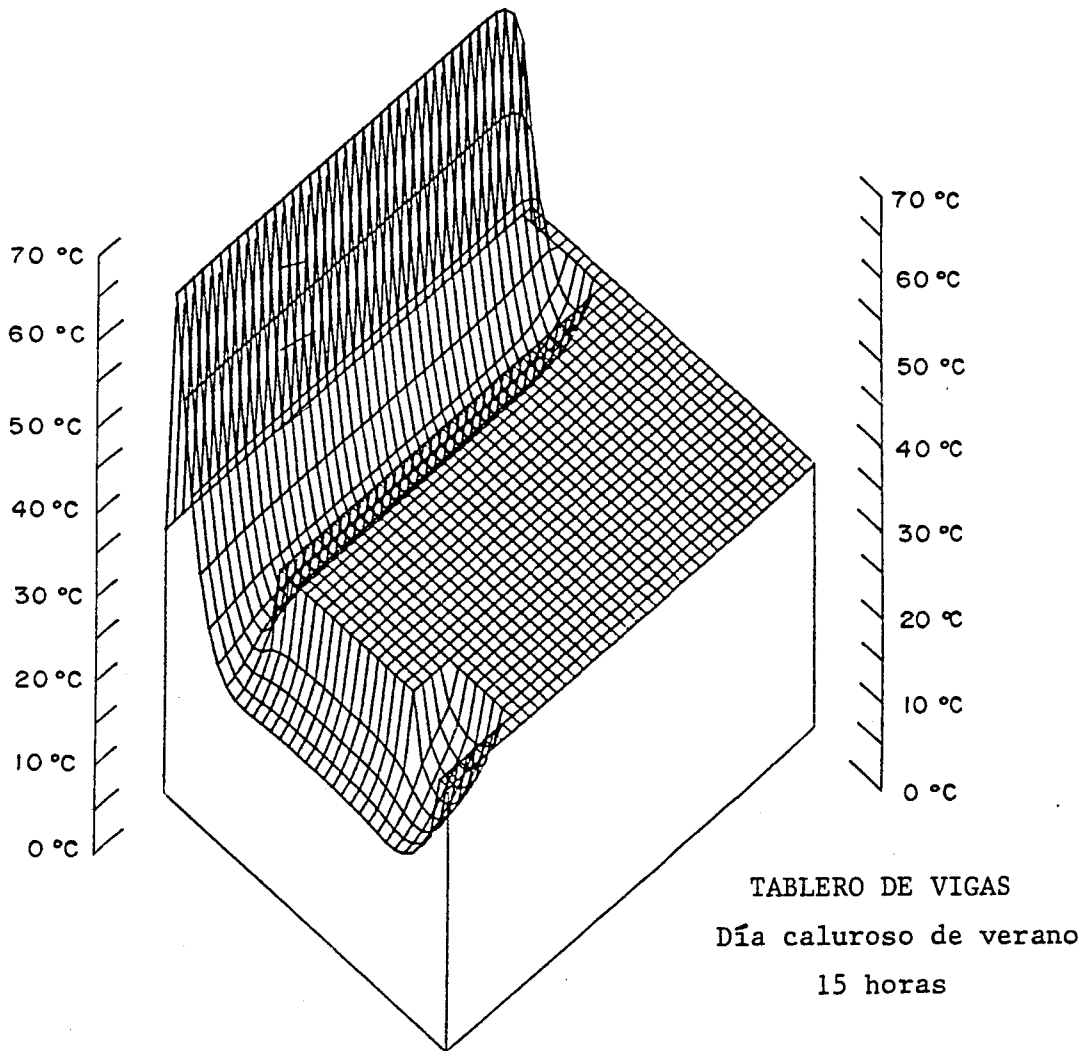


FIG. 7.71

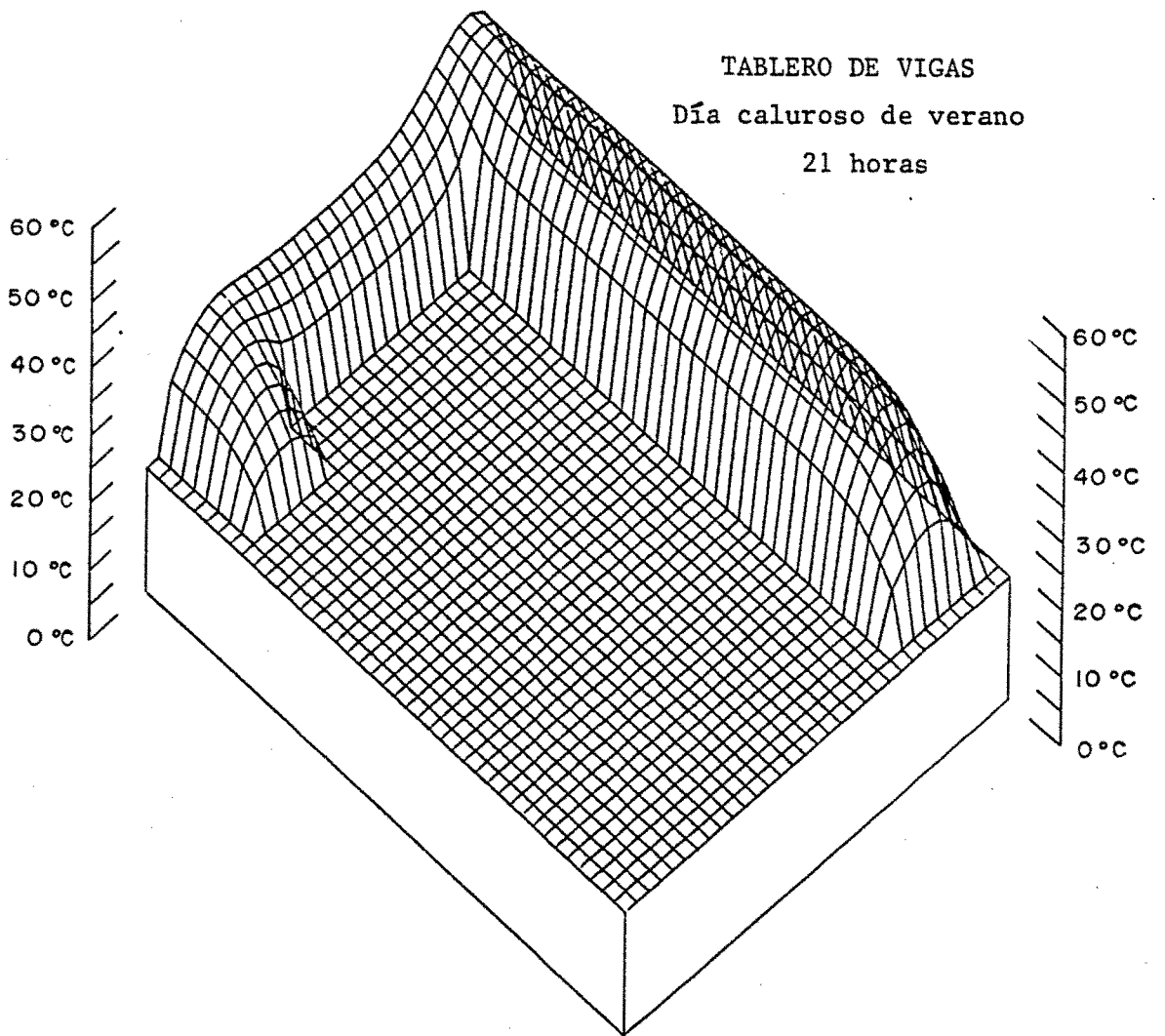


FIG. 7.72

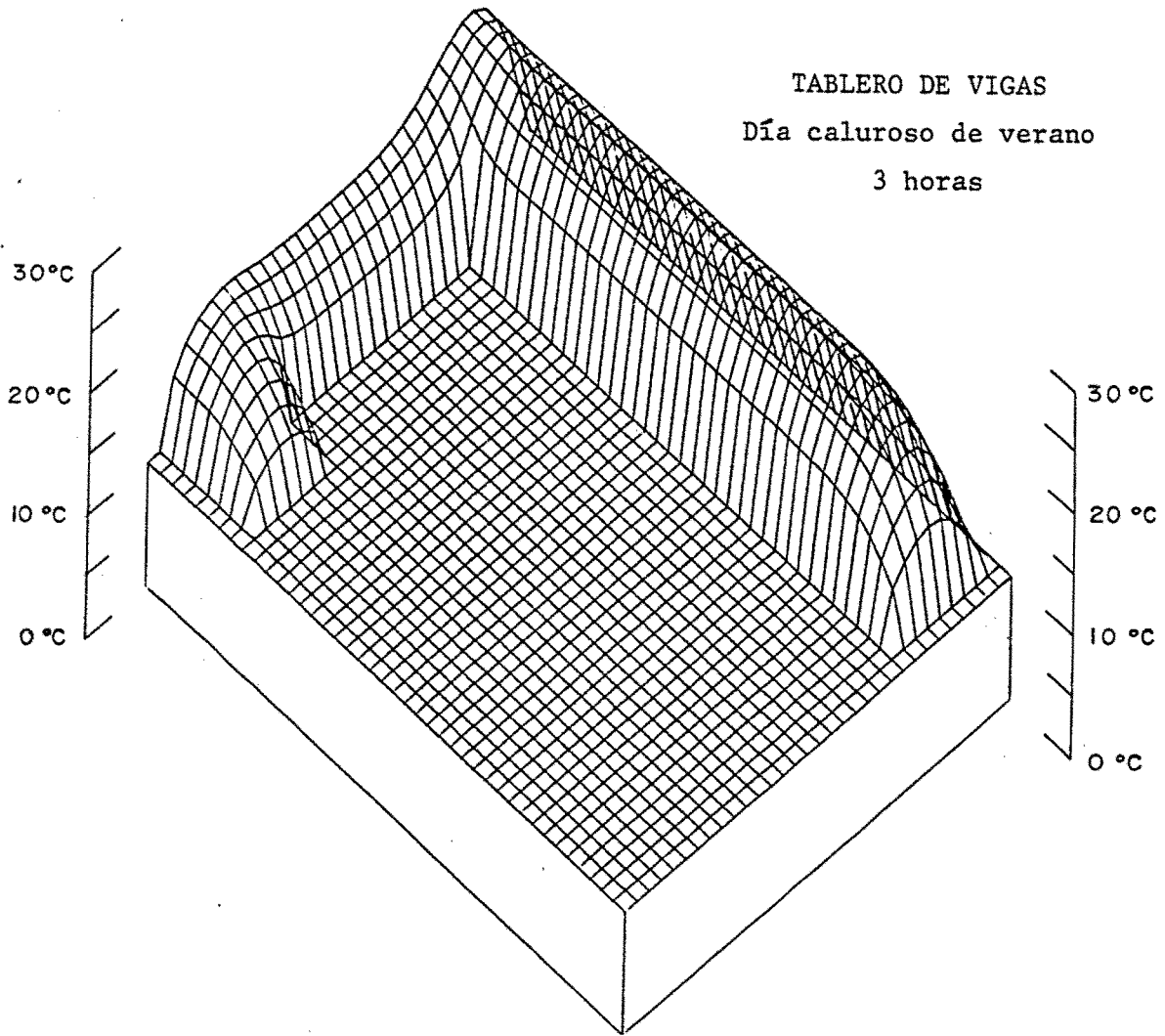


FIG. 7.73

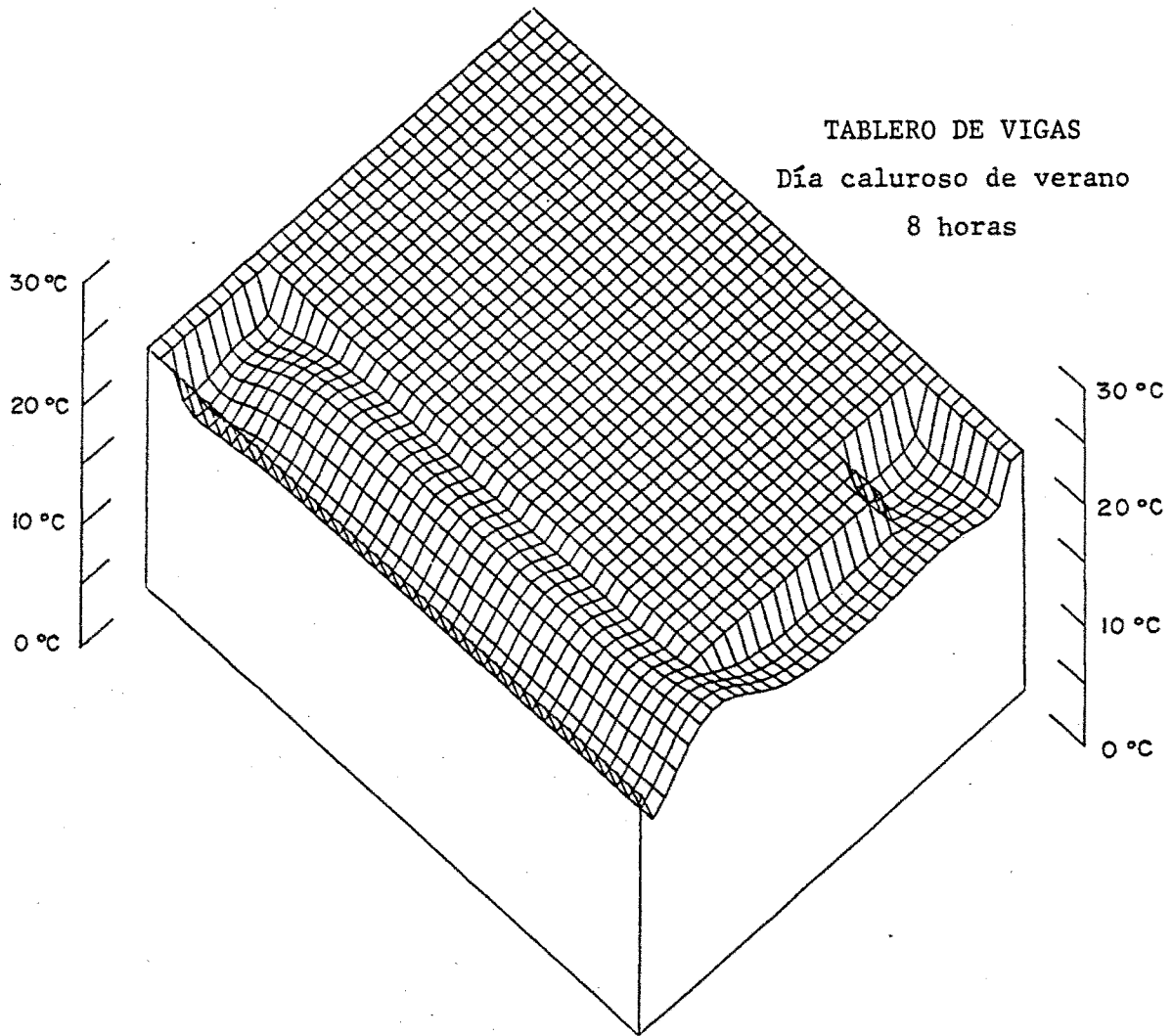


FIG.7.74

ras (7.67 a 7.70 y 7.79 a 7.82) y puentes de vigas figuras (7.71 a 7.74 y 7.83 a 7.86), y además deberán contrastarse los resultados para los puentes con tablero de tipo losa (figuras 7.95 a 7.98).

Se han considerado unos casos de tableros de puentes con dimensiones muy habituales que se muestran acotados en la figura 7.62. En el caso del tablero de sección cajón y del tablero multicelular el tamaño de malla utilizado ha sido de diez centímetros y en el caso del puente de vigas ha sido de cinco centímetros (figura 7.85).

Por simetría, el cálculo y el dibujo se ejecutan siempre de medio tablero, y en el caso de puente de vigas se considera una sola viga ya que en la zona central de la losa de unión entre dos vigas, por simetría, el flujo es vertical y por tanto se pueden considerar cada viga por separado. Además se puede suponer la simetría en la propia viga para ahorrar puntos de cálculo.

Se adjuntan para cada caso los diagramas de las superficies de temperatura de cada sección de tableros (figuras 7.63 a 7.86) a las siguientes horas del día: 15,00 horas, 21,00 horas, 3 horas y 8 horas.

Además se efectúan dos cálculos diferentes para cada tablero, uno correspondiente a un día caluroso de verano (figuras

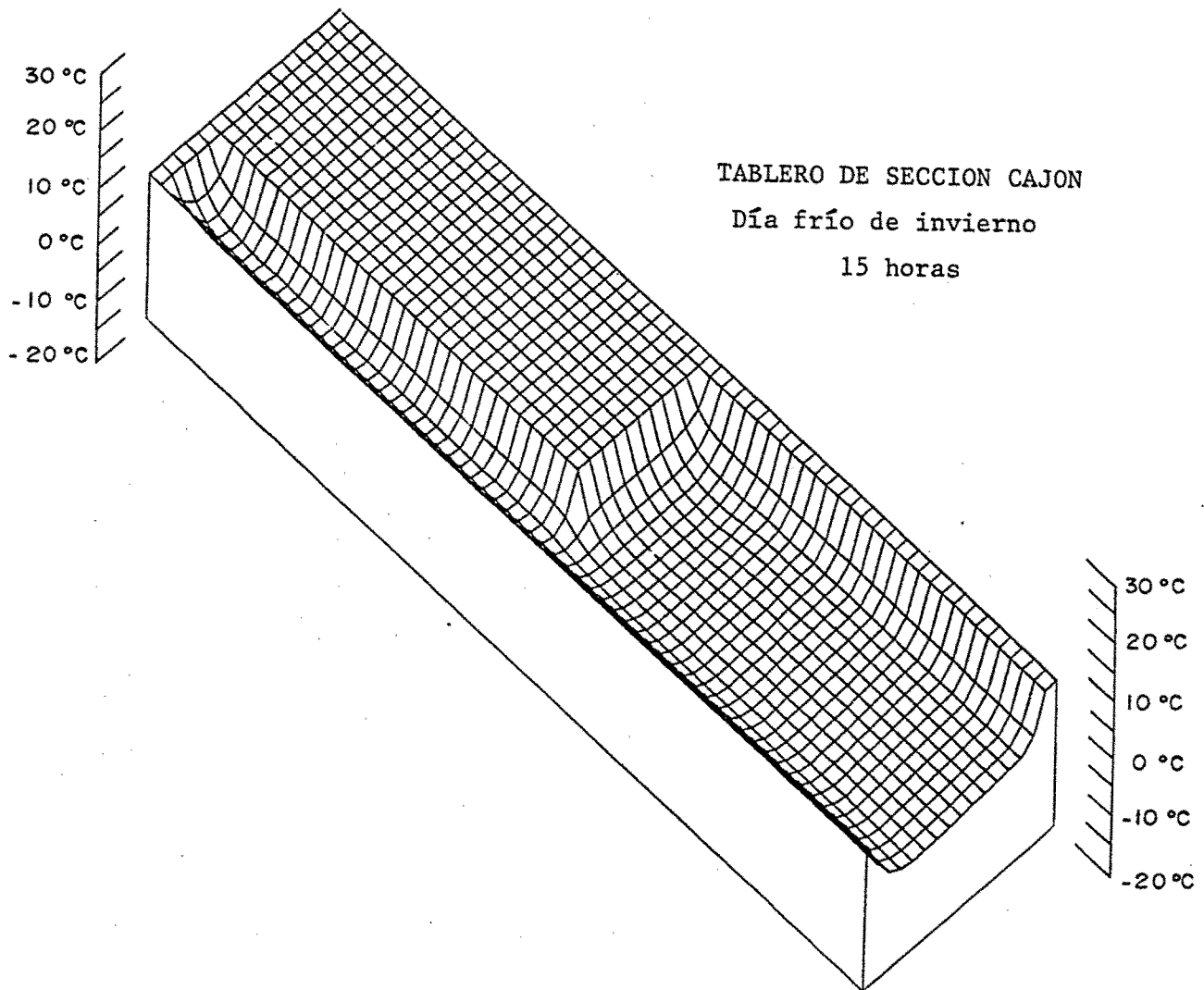


FIG. 7. 75

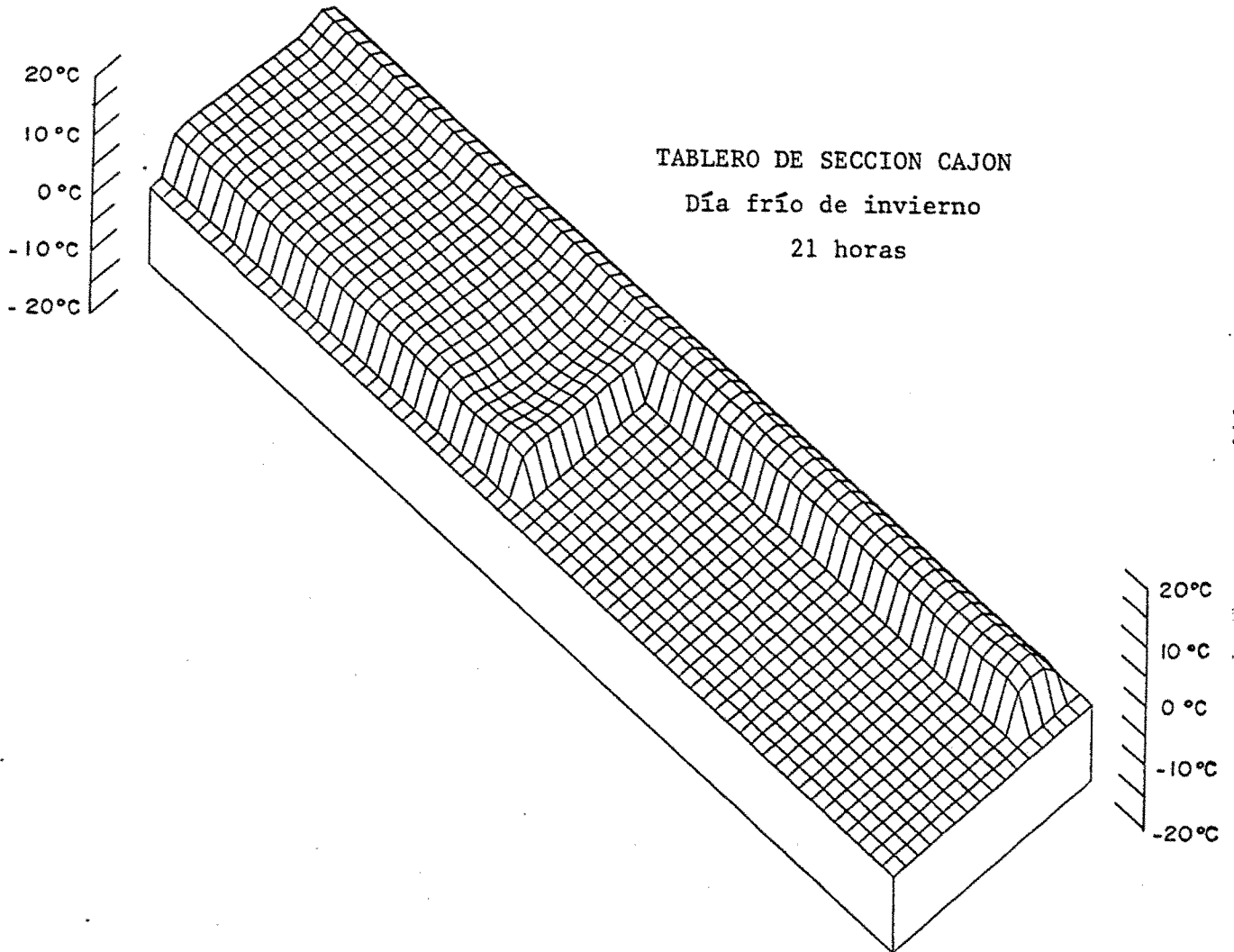


FIG. 7.76

TABLERO DE SECCION CAJON
Día frío de invierno
3 horas

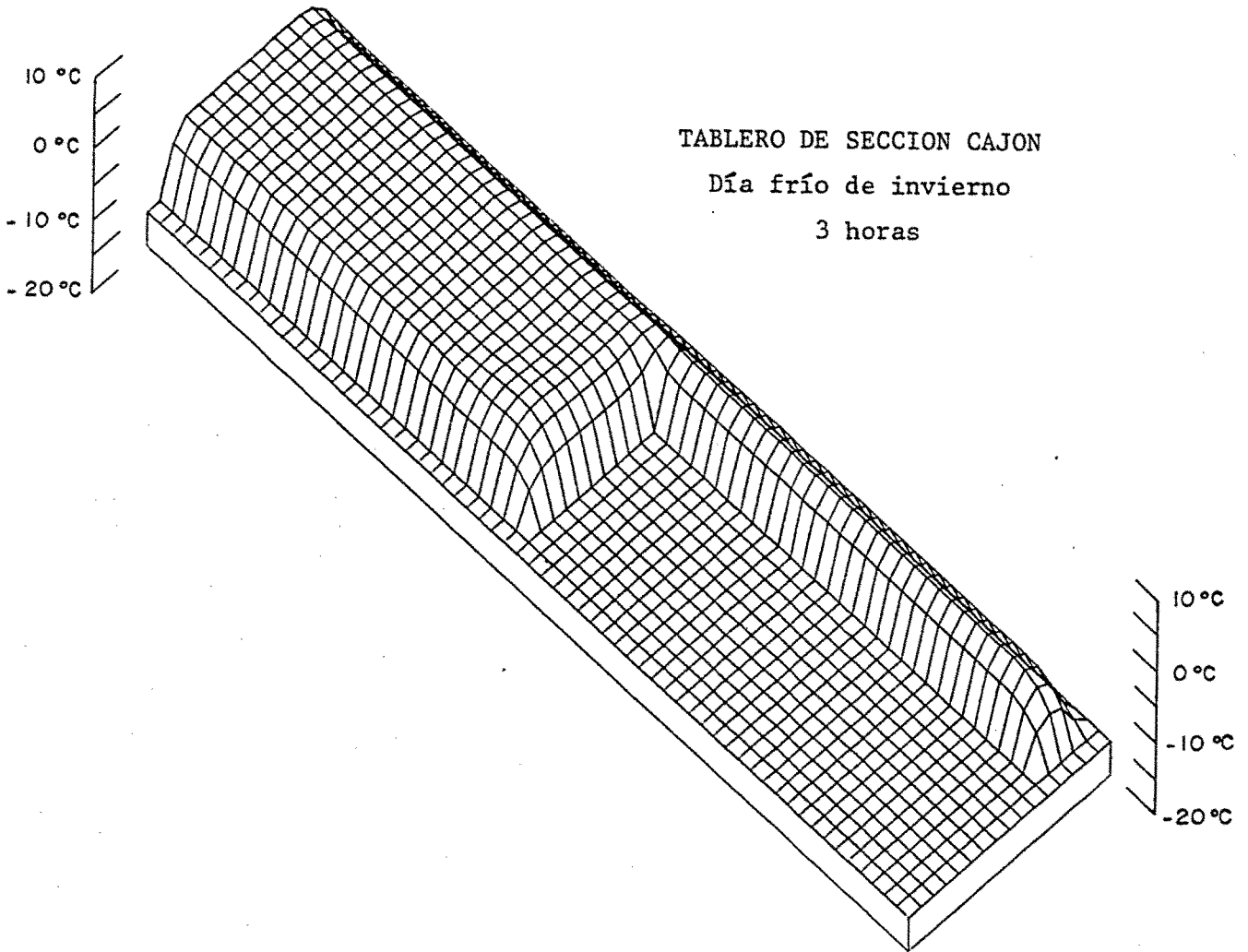


FIG. 7.77

TABLERO DE SECCION CAJON
Día frío de invierno
8 horas

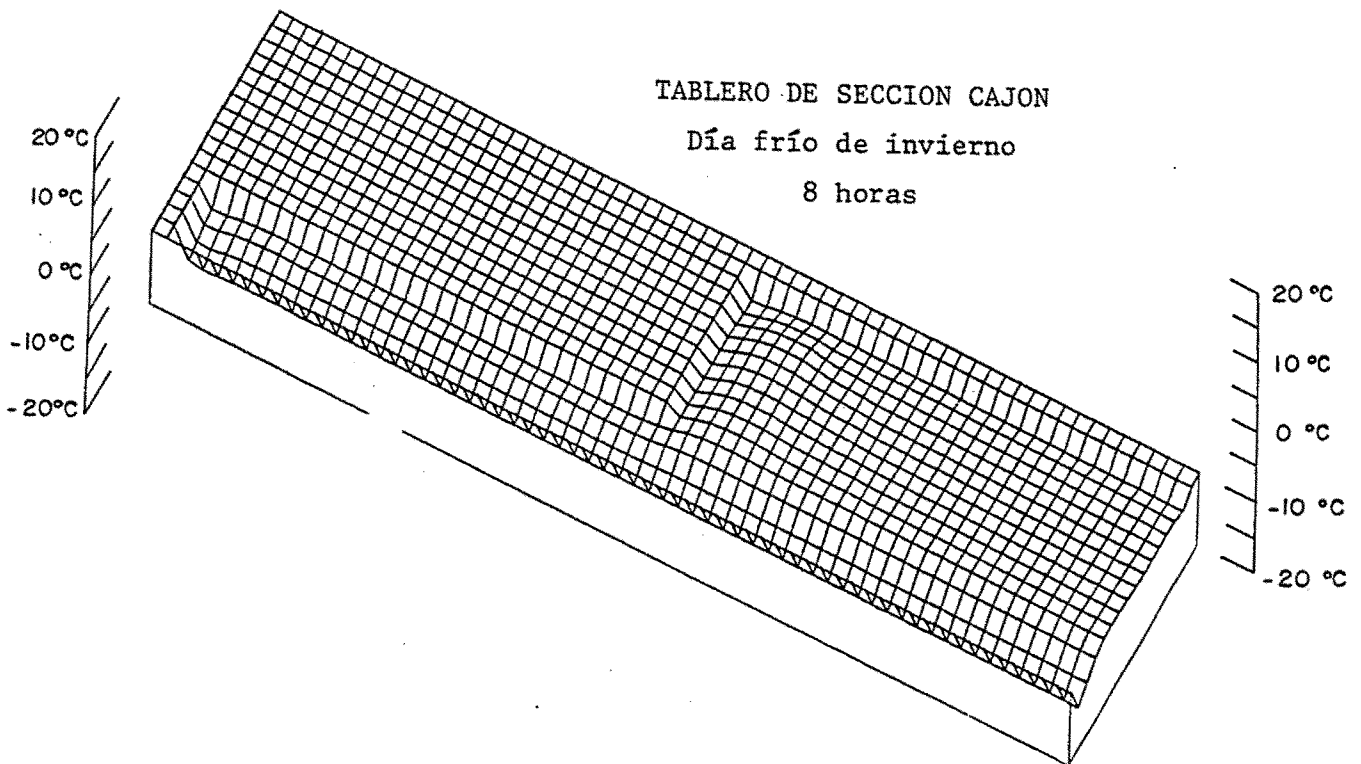


FIG. 7.78

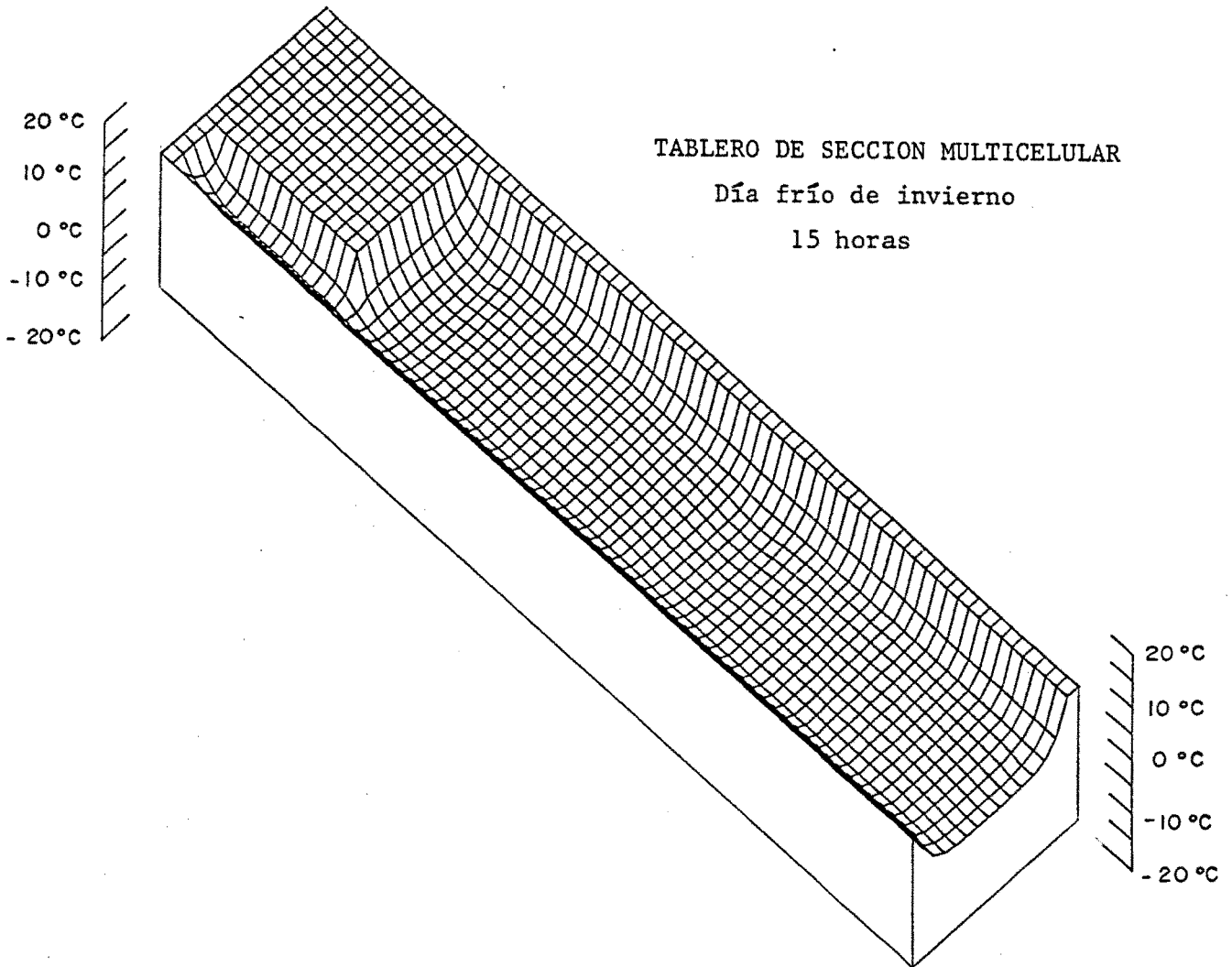


FIG. 7.79

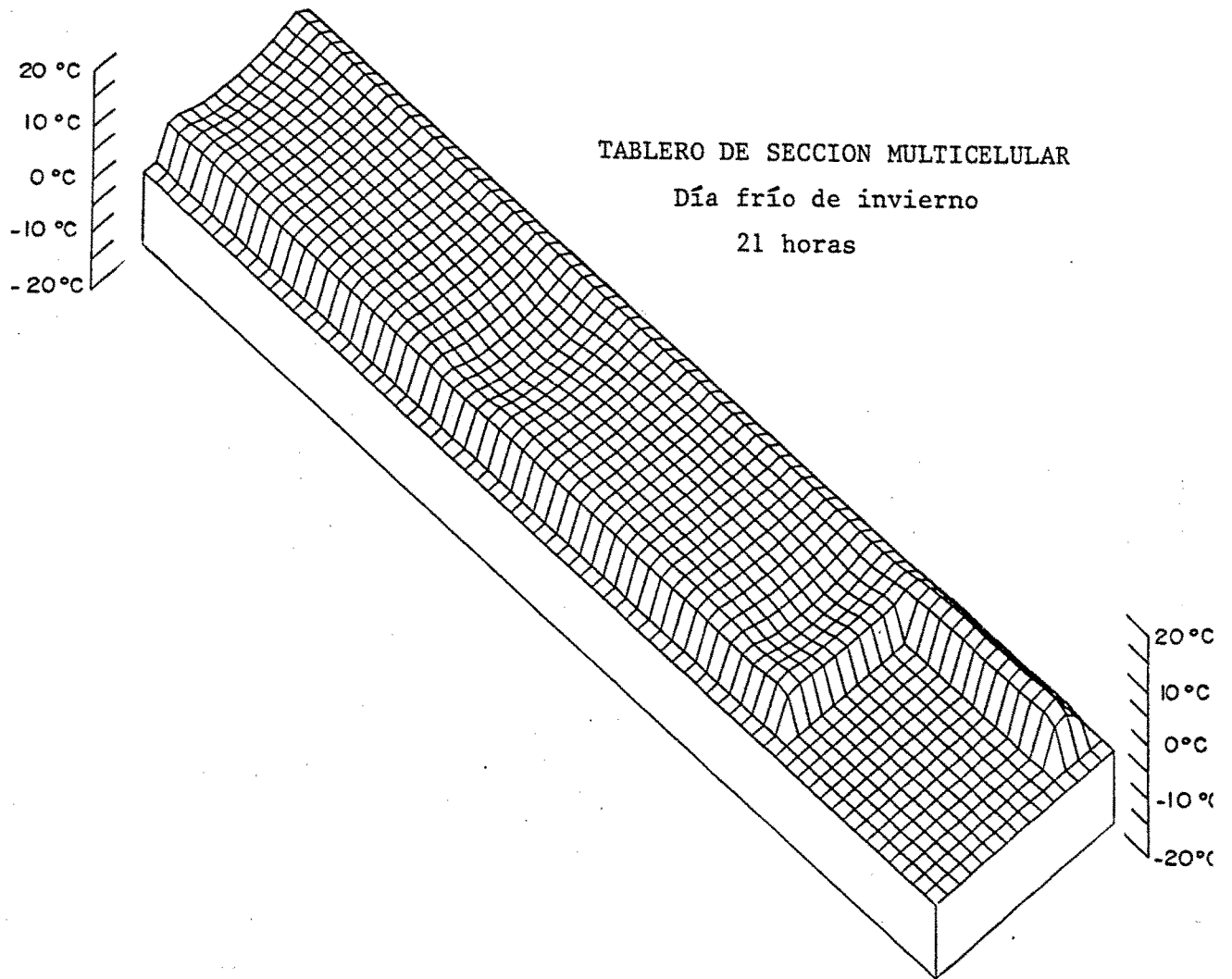


FIG. 7.80

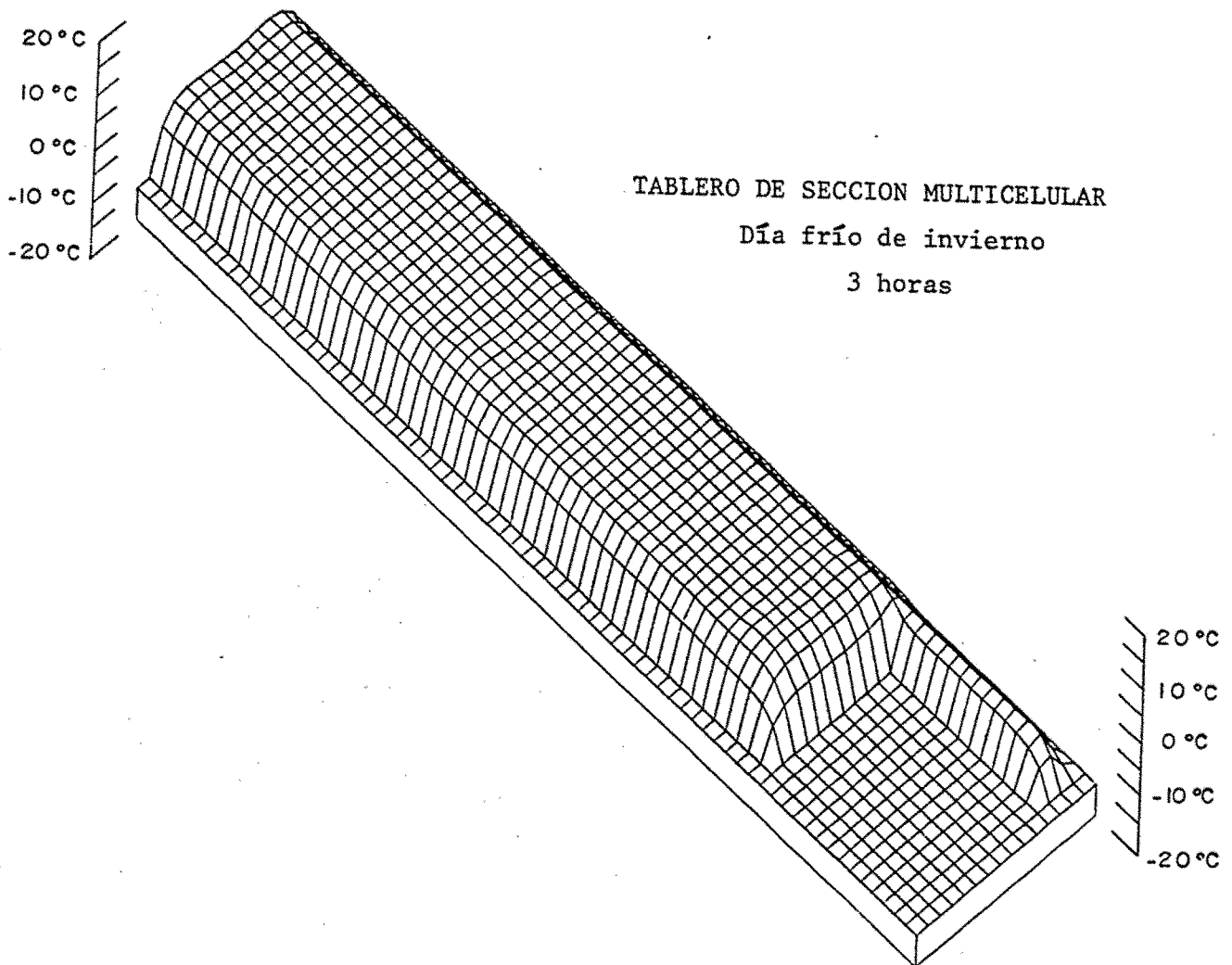


FIG. 7.81

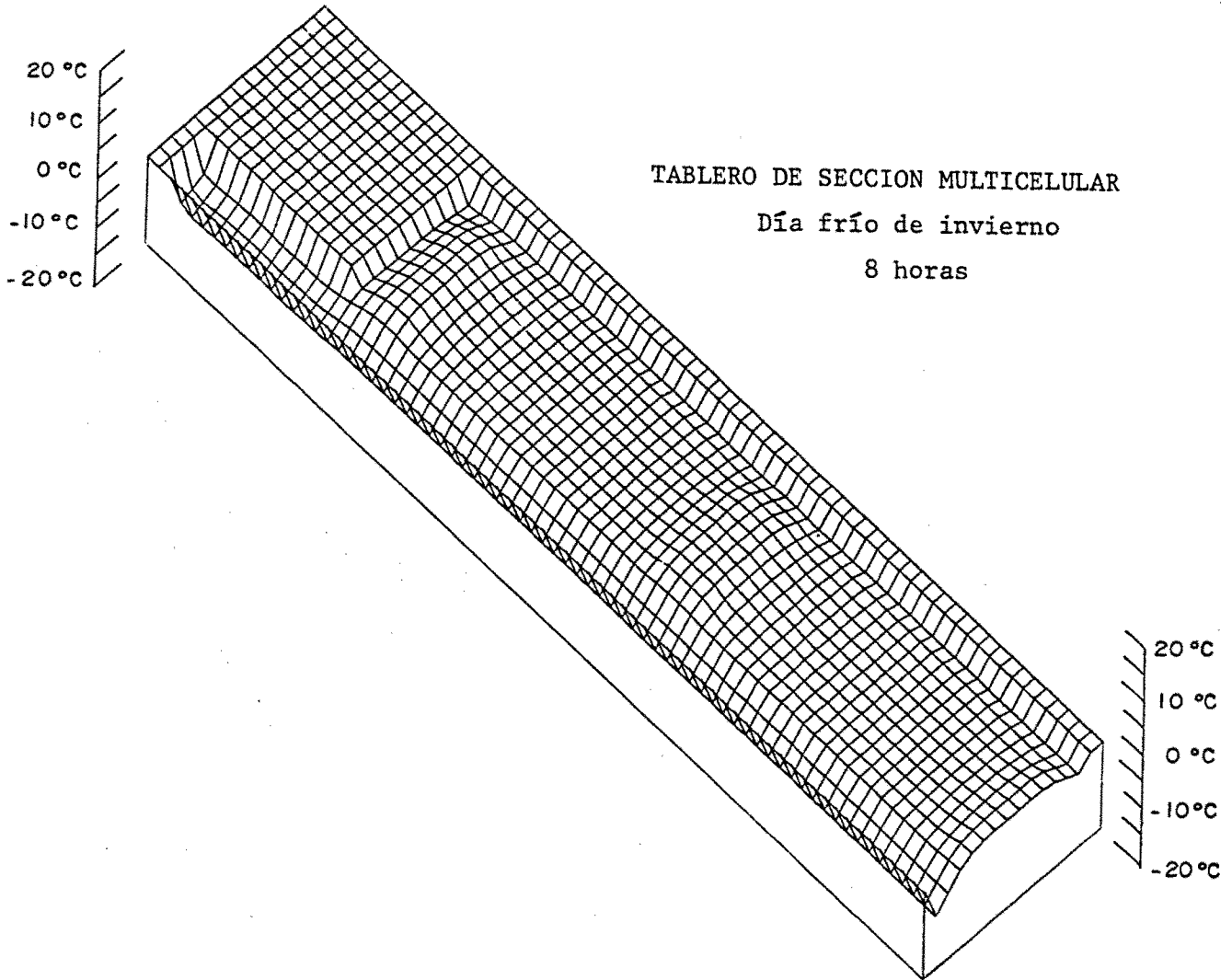


FIG. 7.82

7.114

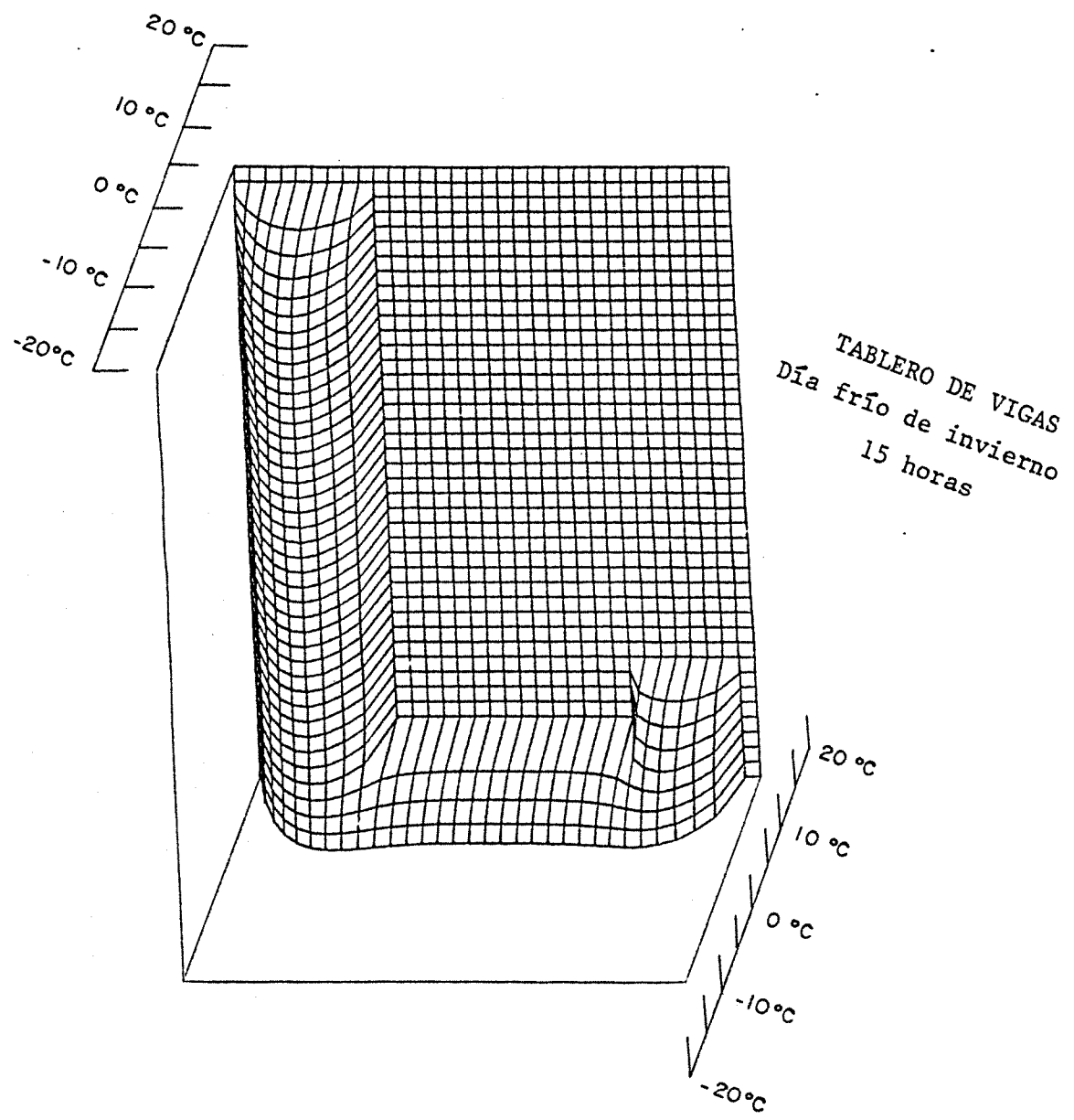


FIG. 7.83

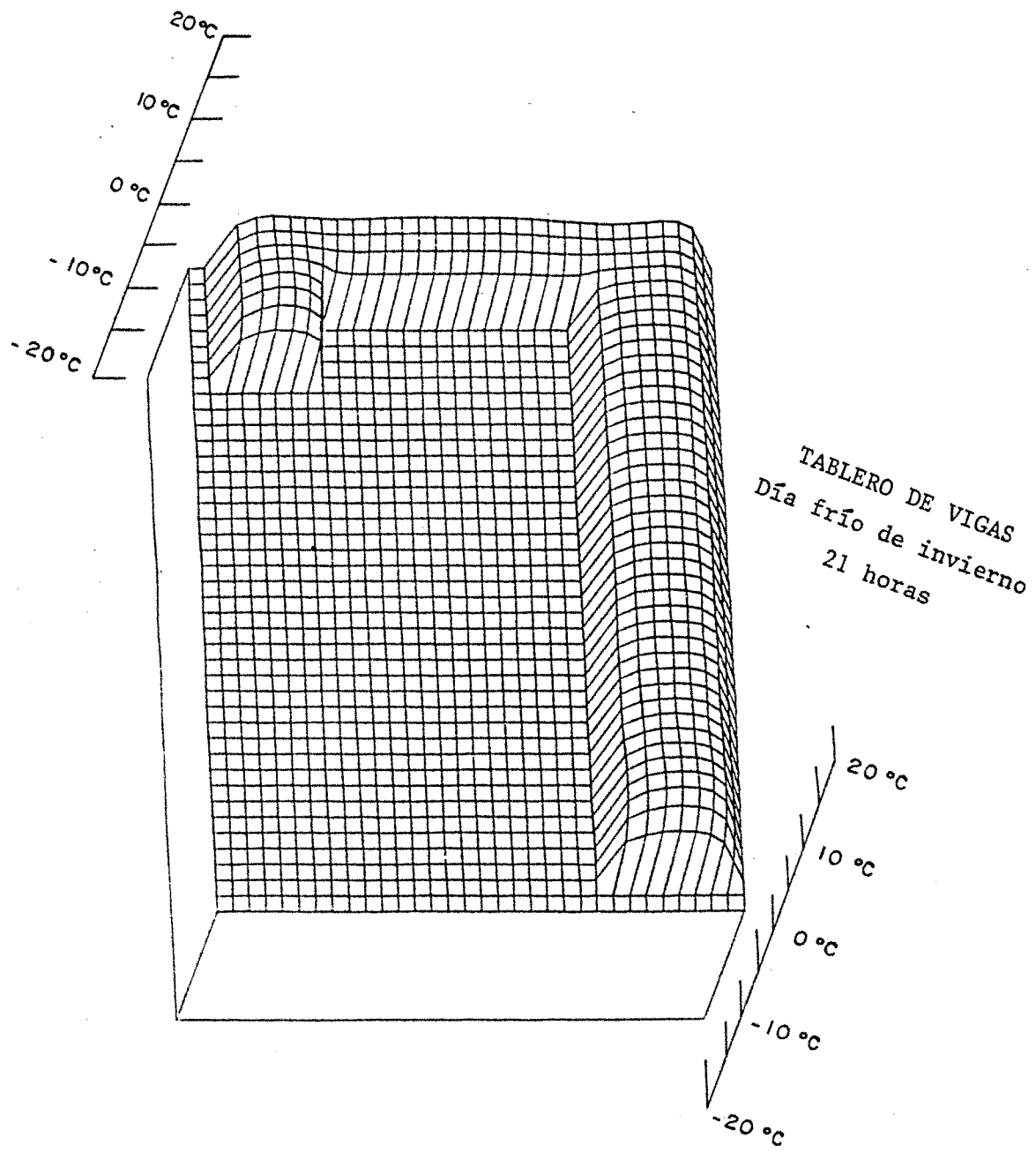


FIG. 7.84

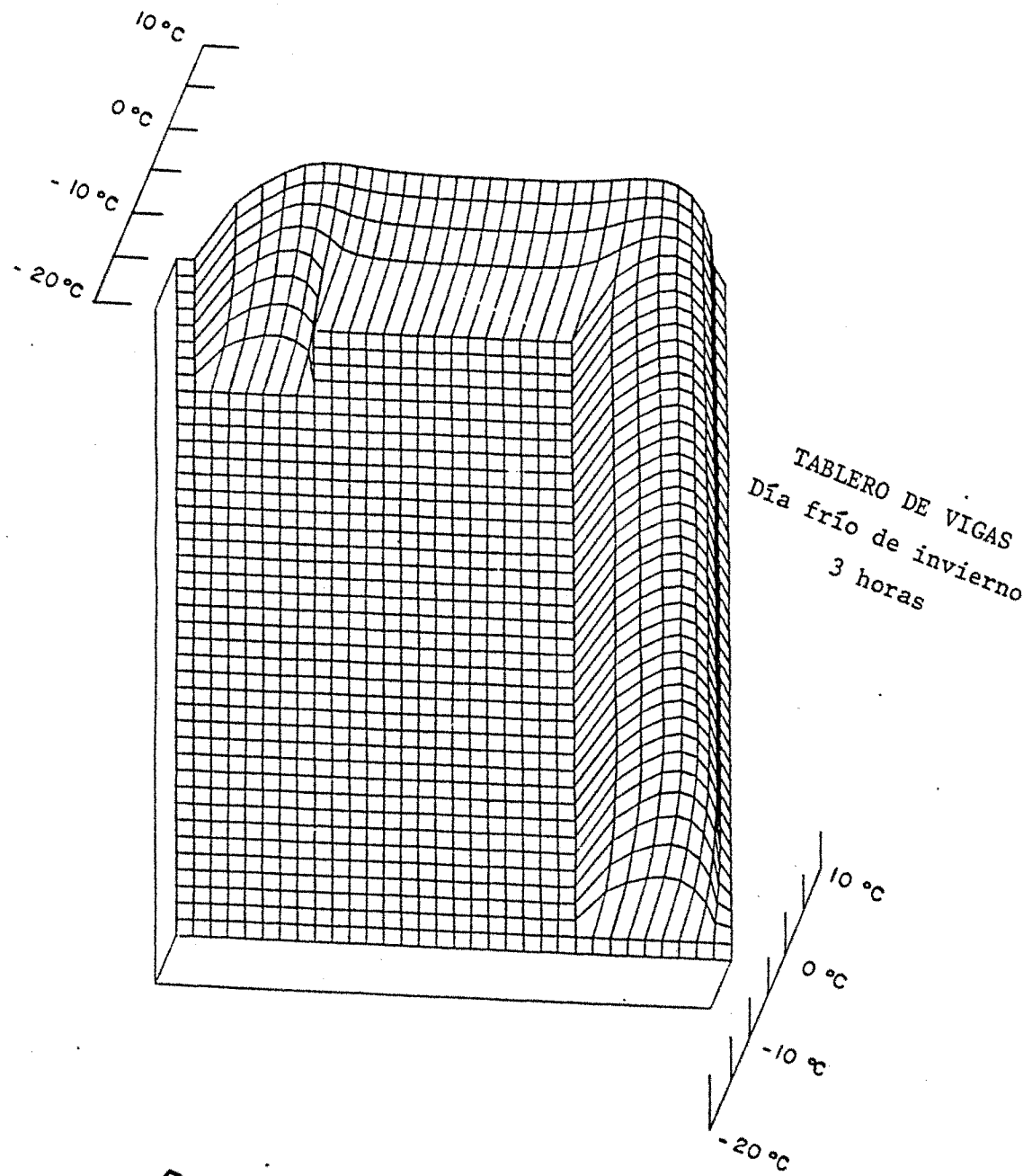


FIG. 7.85

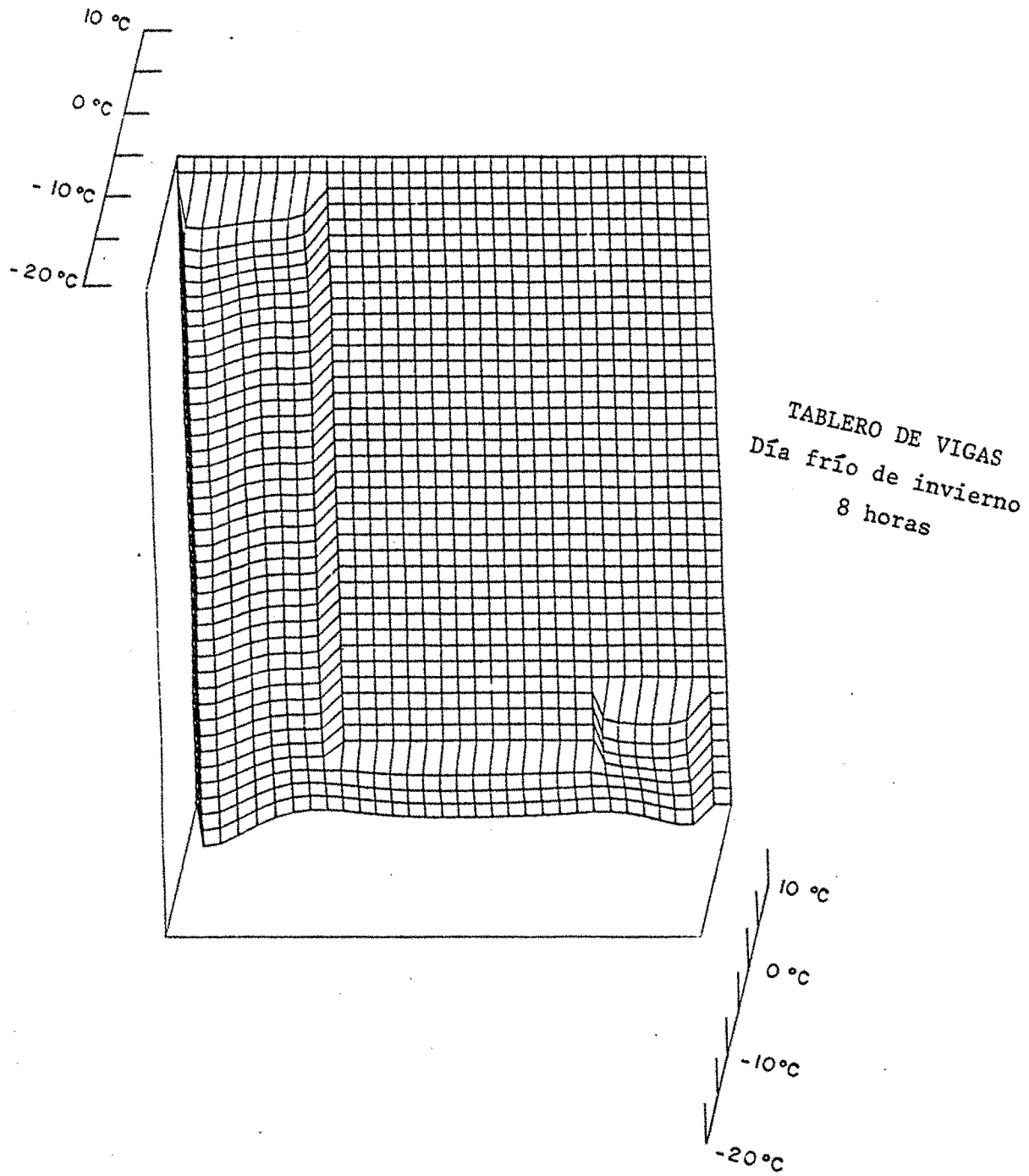


FIG. 7.86

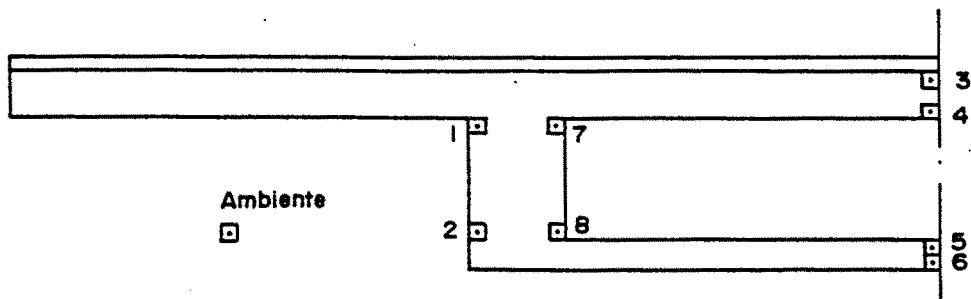
7.63 a 7.74) con temperatura media de 20°C y una oscilación de $\pm 10^\circ\text{C}$, la radiación solar considerada es de 9500 W.hora/m² y se considera una pérdida de radiación nocturna de 100 W/m². El cálculo correspondiente al día frío de invierno (figuras 7.75 a 7.86) supone -5°C de temperatura ambiente con una oscilación de 10°C . La radiación solar incidente se considera prácticamente nula y la pérdida de radiación térmica nocturna se supone igual a 130 W/m².

7.2.3. EVOLUCION DE LA TEMPERATURA EN PUNTOS CARACTERISTICOS

Para cada tablero estudiado en el punto anterior se han definido una serie de puntos que lo caractericen y que se representan en la figura 7.87.

En la sección cajón se han considerado los cuatro puntos que definen el rectángulo del alma (puntos 1,2,7,8 de la figura 7.87a) con el fin de estudiar los gradientes térmicos que se producen en el alma. Se han estudiado también los puntos que definen la sección central del tablero (puntos 3,4,5,6 de la figura 7.87a).

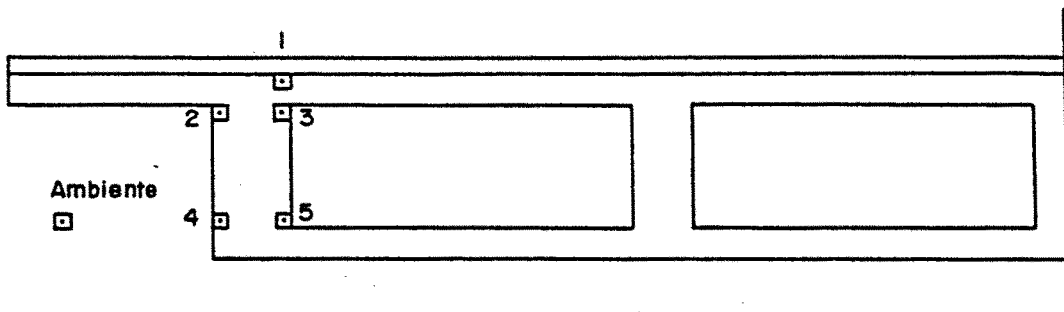
Los resultados se expresan en la figura 7.88a y 7.88b. En la figura 7.88 se representan la evolución de la temperatura de los puntos 1,2,7 y 8 además de la curva de temperatura ambiente. Para el estudio del gradiente de temperaturas en el



a) TABLERO DE SECCION CAJON

Lado de retícula de cálculo = 0.10 m.

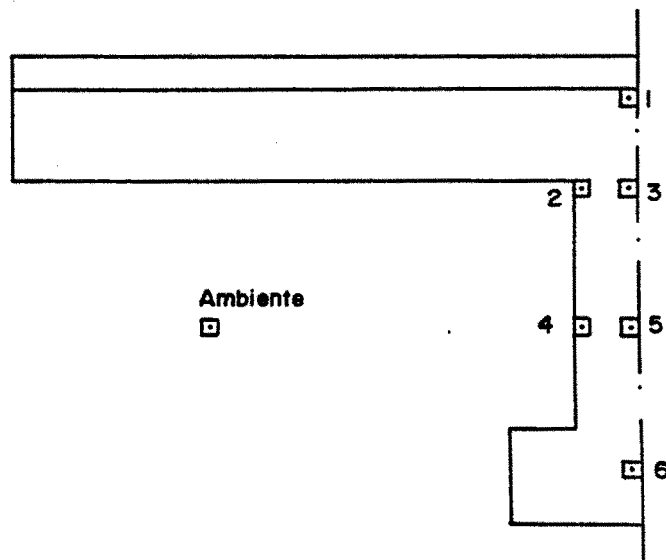
Escala 1/50



b) TABLERO DE SECCION MULTICELULAR

Lado de la retícula de cálculo = 0.10 cm.

Escala 1/50



c) TABLERO DE VIGAS

Lado de la retícula de cálculo = 0.05 cm.

Escala 1/25

Figura 7.87

TABLERO DE SECCION CAJON
Día caluroso de verano

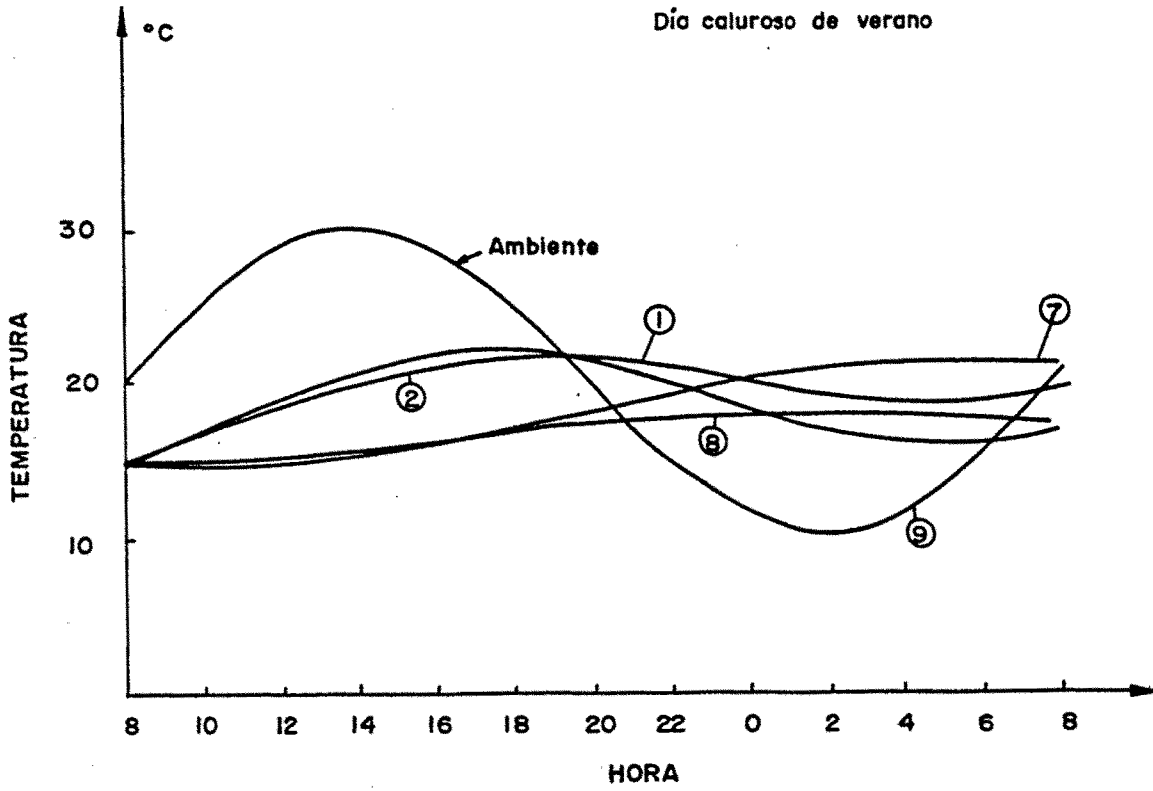


Figura 7.88 a

TABLERO DE SECCION CAJON
Día caluroso de verano

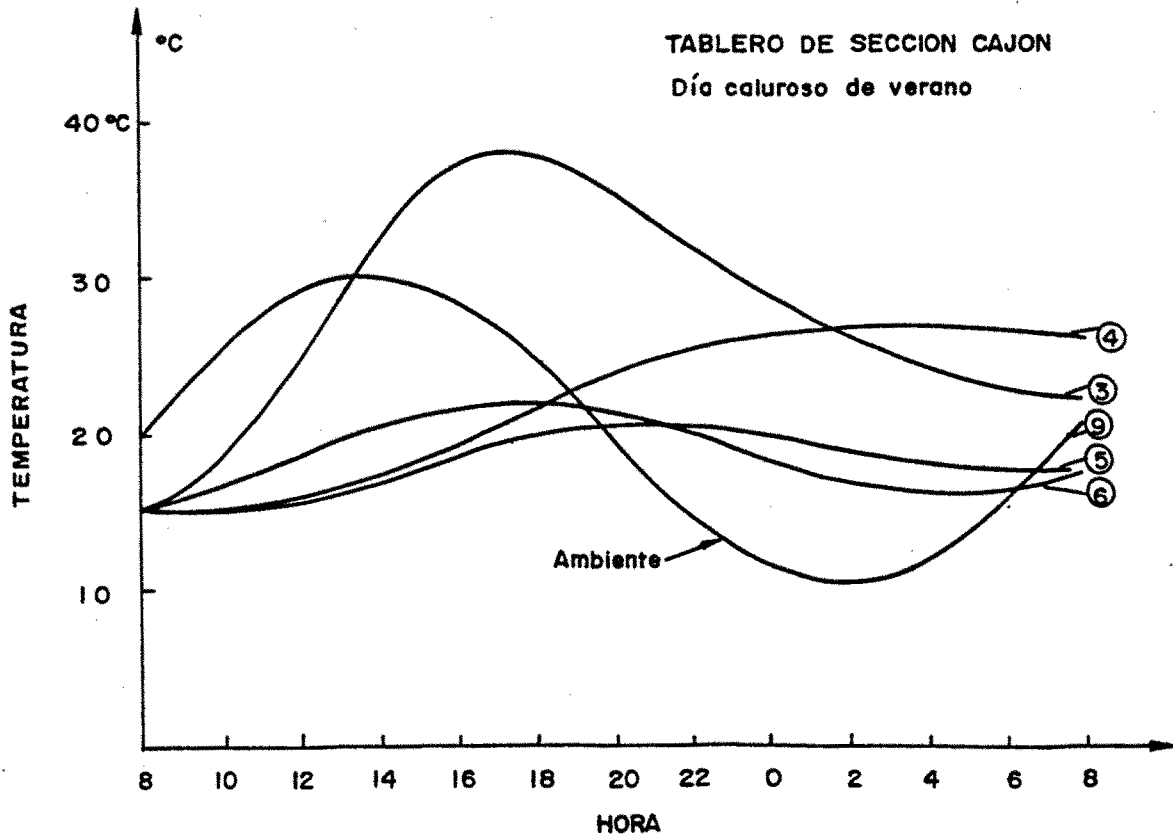


Figura 7.88 b

alma es preciso comparar las parejas de curvas 1-7 y 2-8 y observar su diferencia de temperaturas. La mayor diferencia se produce entre las curvas 1 y 7, aproximadamente entre las 15 horas y las 16 horas con unos valores próximos a 5°C .

Sin embargo, debe considerarse que esta diferencia se establece entre los centros de las retículas del alma cuando lo que de verdad interesa es la diferencia entre las dos superficies interiores y exteriores del alma. Si se considera la curva de finida por los puntos de la malla y además se extrapola a los puntos de la superficie, esta diferencia de temperaturas puede llegar a 10°C (figura 7.89). Además, en el ejemplo utilizado, la máxima temperatura ambiente es de 30°C y por lo tanto, con temperaturas superiores, por ejemplo supuesto un día de temperatura máxima 45°C , el gradiente de temperaturas en el alma podría llegar a 15°C .

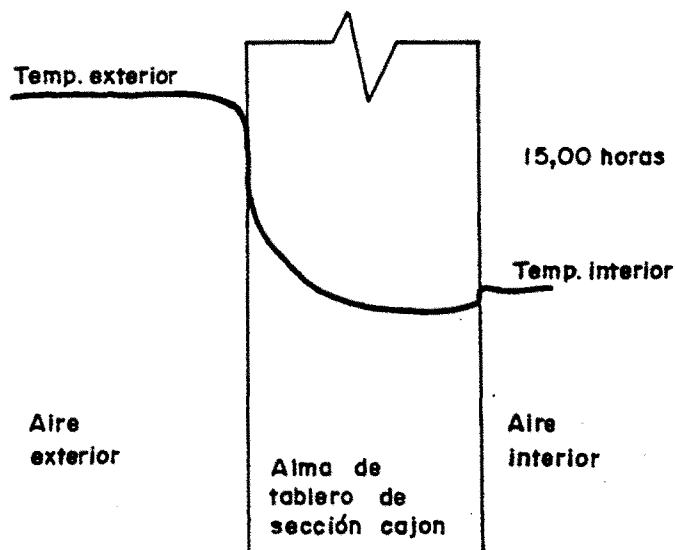


Figura 7.89

No obstante no se pueden fijar reglas ya que las cargas térmicas del puente, deben calcularse dependiendo de su situación geográfica (capítulo 4 de esta tesis) y no aplicando un criterio general para todos los casos.

En la figura 7.88b se recogen los datos de la evolución de las temperaturas en los puntos 3,4,5,6. Es importante notar que el máximo gradiente se produce a las 15 horas, como confirmación de los resultados obtenidos en el caso de puente de sección cajón en el estudio unidimensional.

En el estudio evolutivo de la sección multicelular la zona fundamental de estudio ha sido el alma exterior debido a que en las gráficas de la superficie de temperaturas comentadas en el punto anterior es la zona más afectada por los gradientes. Debido a ello, en la figura 7.87b se observan los puntos considerados, y en la figura 7.90 se obtiene la evolución en el tiempo de la temperatura en dichos puntos y la temperatura ambiente. Los datos atmosféricos son los mismos que para el caso de puente con tablero de sección cajón, por ello el resultado, referido al gradiente en el alma exterior (puntos 2-3 y 4-5), es igual que en el anterior caso de sección cajón, considerando además las mismas observaciones.

Otra observación importante es la agrupación de curvas que se produce al final del proceso (las 8 horas del día siguiente)

TABLERO DE SECCION MULTICELULAR
Día caluroso de verano

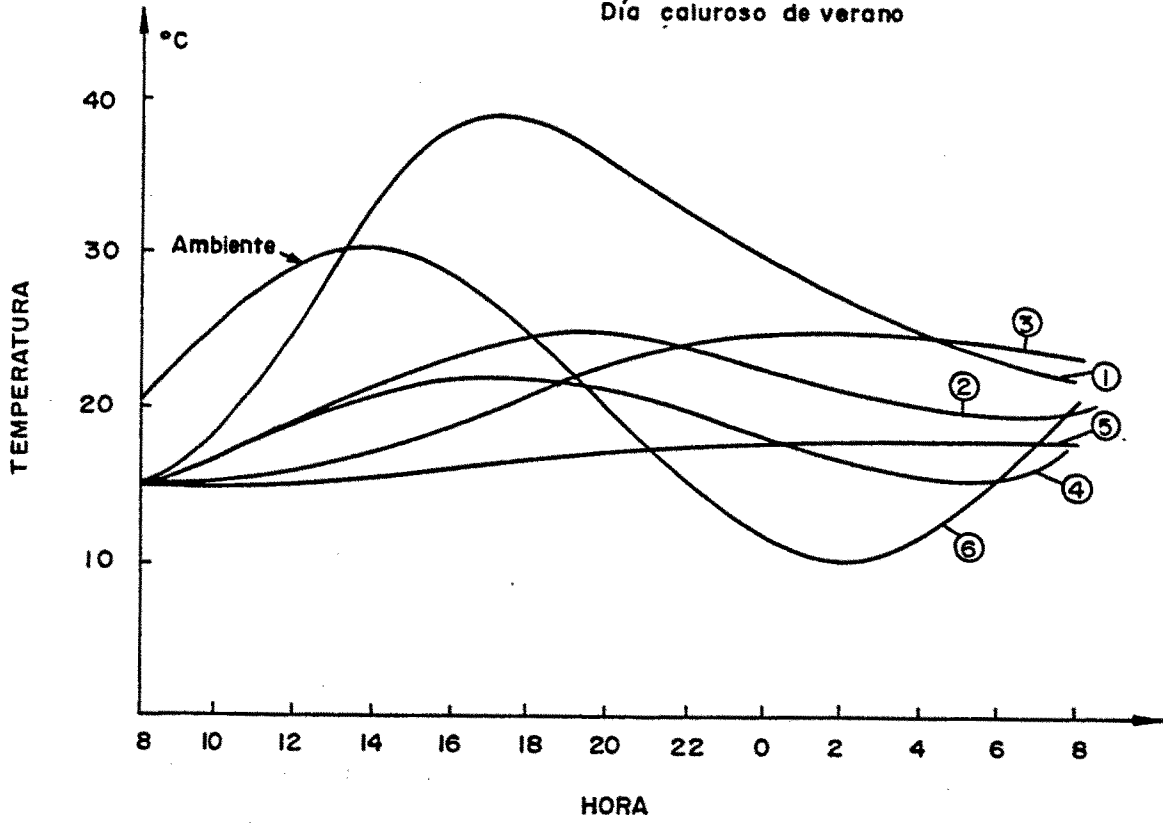


Figura 7.90

TABLERO DE VIGAS
Día caluroso de verano

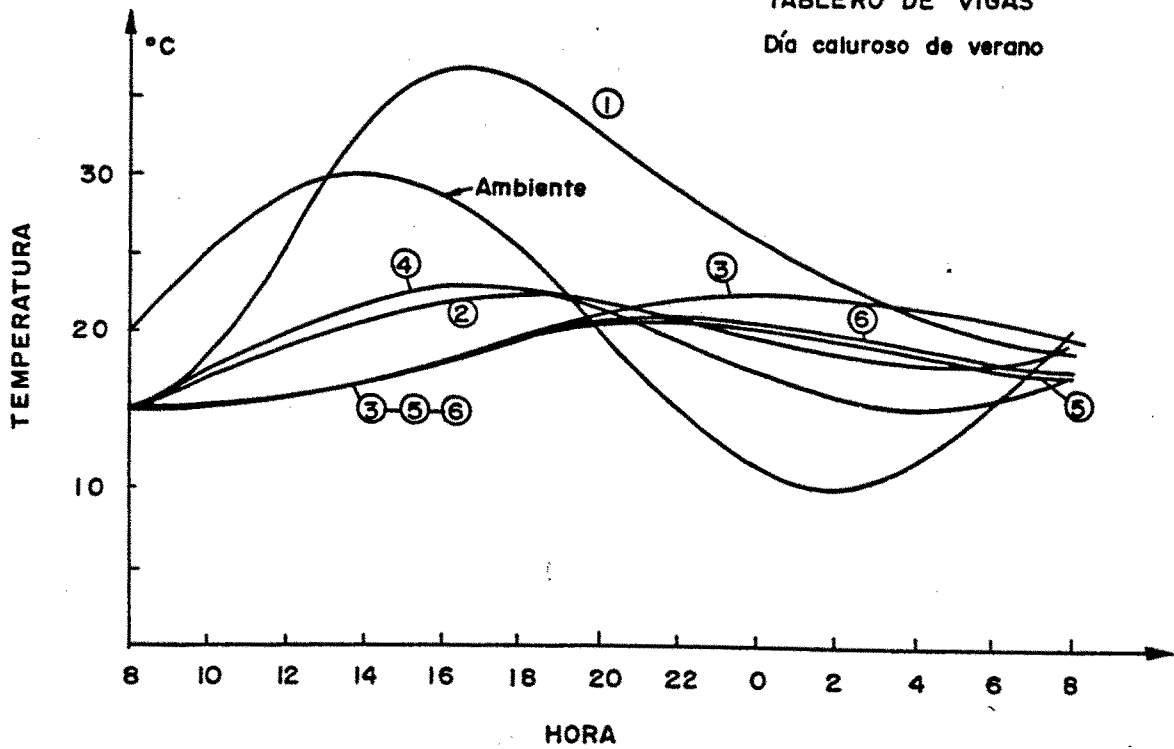


Figura 7.91

que indica, la uniformidad de temperaturas que se produce a dicha hora. Este hecho ya se había puesto de manifiesto en puntos anteriores, y dio lugar a la base de partida de comienzo de todos los procesos a las 8 horas.

Los resultados referidos al puente de vigas se reflejan en la figura 7.91. El punto 1 de la superficie tiene una curva que es prácticamente idéntica que en los demás tipos de tablero (se han supuesto las mismas condiciones ambientales). Los puntos del contorno 2 y 4, siguen curvas prácticamente paralelas y los puntos de la vertical del eje de simetría se representan en la figura 7.92.

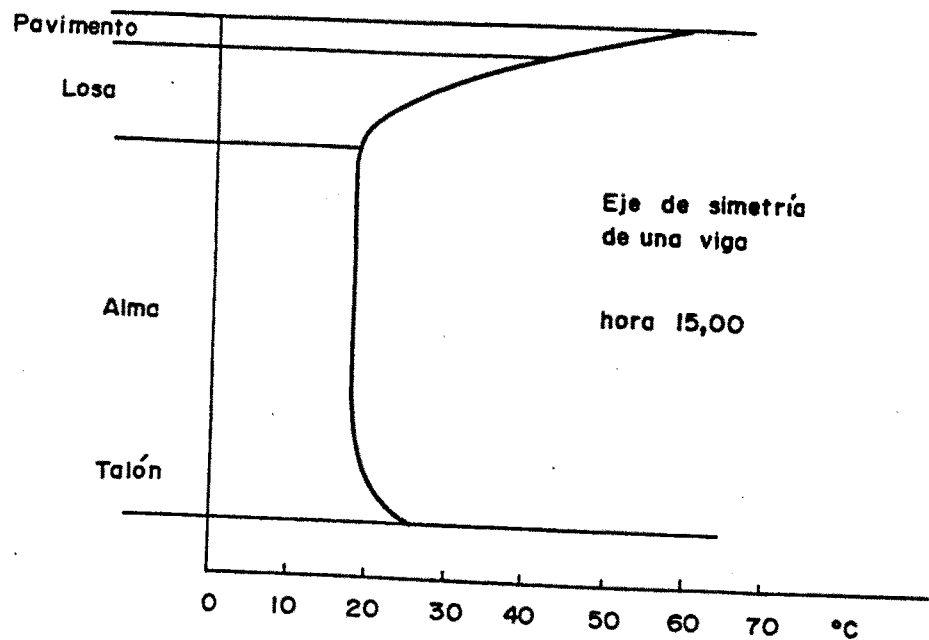


Figura 7.92

El análisis de la figura 7.92 sugiere la definición de un diagrama térmico de cálculo formado por una distribución trapezoidal en la losa y una distribución uniforme en el alma según la figura 7.93.

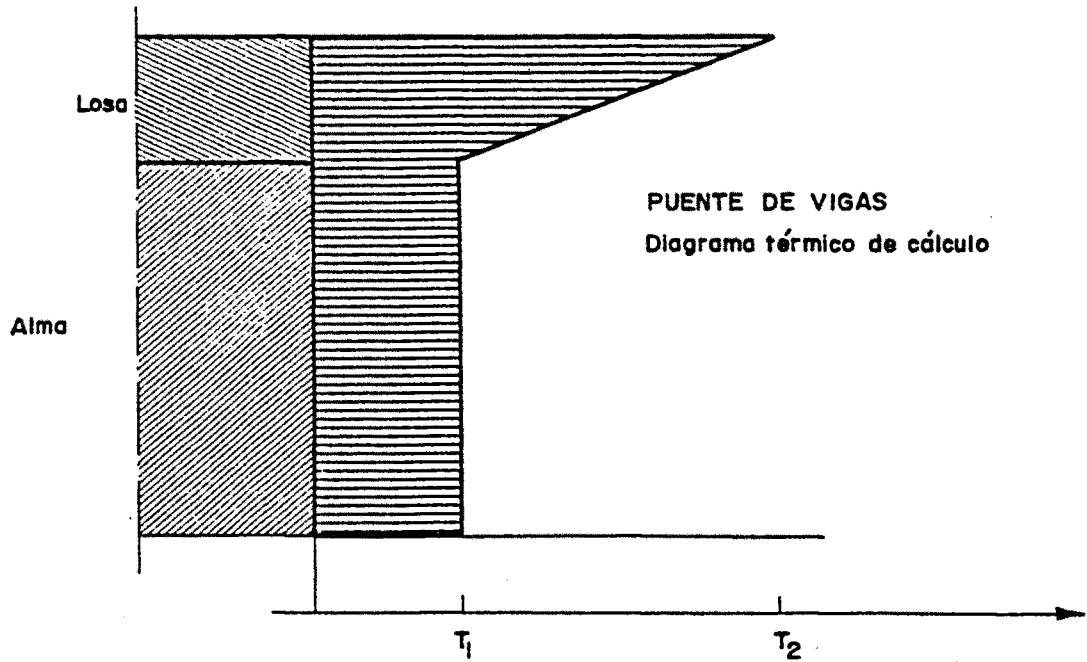


Figura 7.93

Los valores de las temperaturas en dicho diagrama se determinarán a partir de las condiciones de contorno ambientales (capítulo 4).

7.3. ANALISIS COMPARATIVO

7.3.1. INTRODUCCION

De los diferentes tipos de tablero de puente definidos en la figura 6.1, los puentes losa y puentes de sección cajón se estudian mediante los dos sistemas de análisis térmico utilizados en esta tesis, es decir, un estudio unidimensional y otro bidimensional, por tanto, deberá hacerse una correlación entre ambos y comprobar las hipótesis.

7.3.2. PUENTE LOSA

En el capítulo 7.1 se efectuó un análisis de los diferentes tipos de losa en función de espesores y diferentes condiciones atmosféricas. Se ha considerado una losa maciza definida en la figura 7.94.

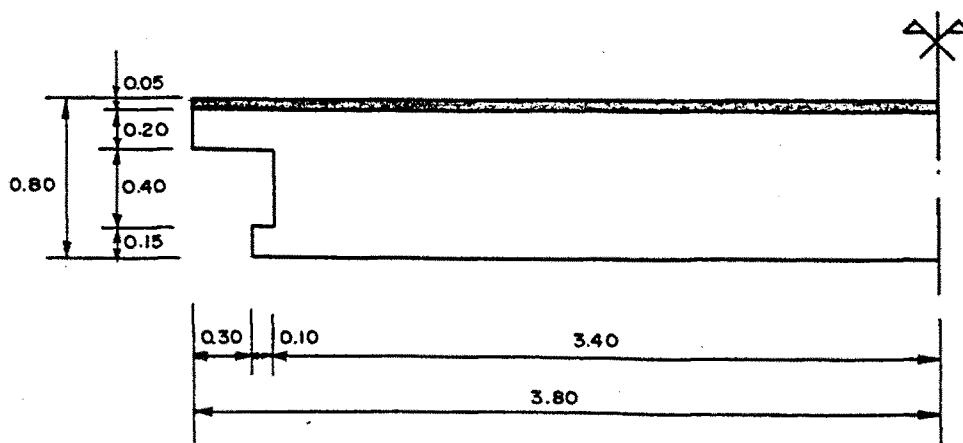


Figura 7.94

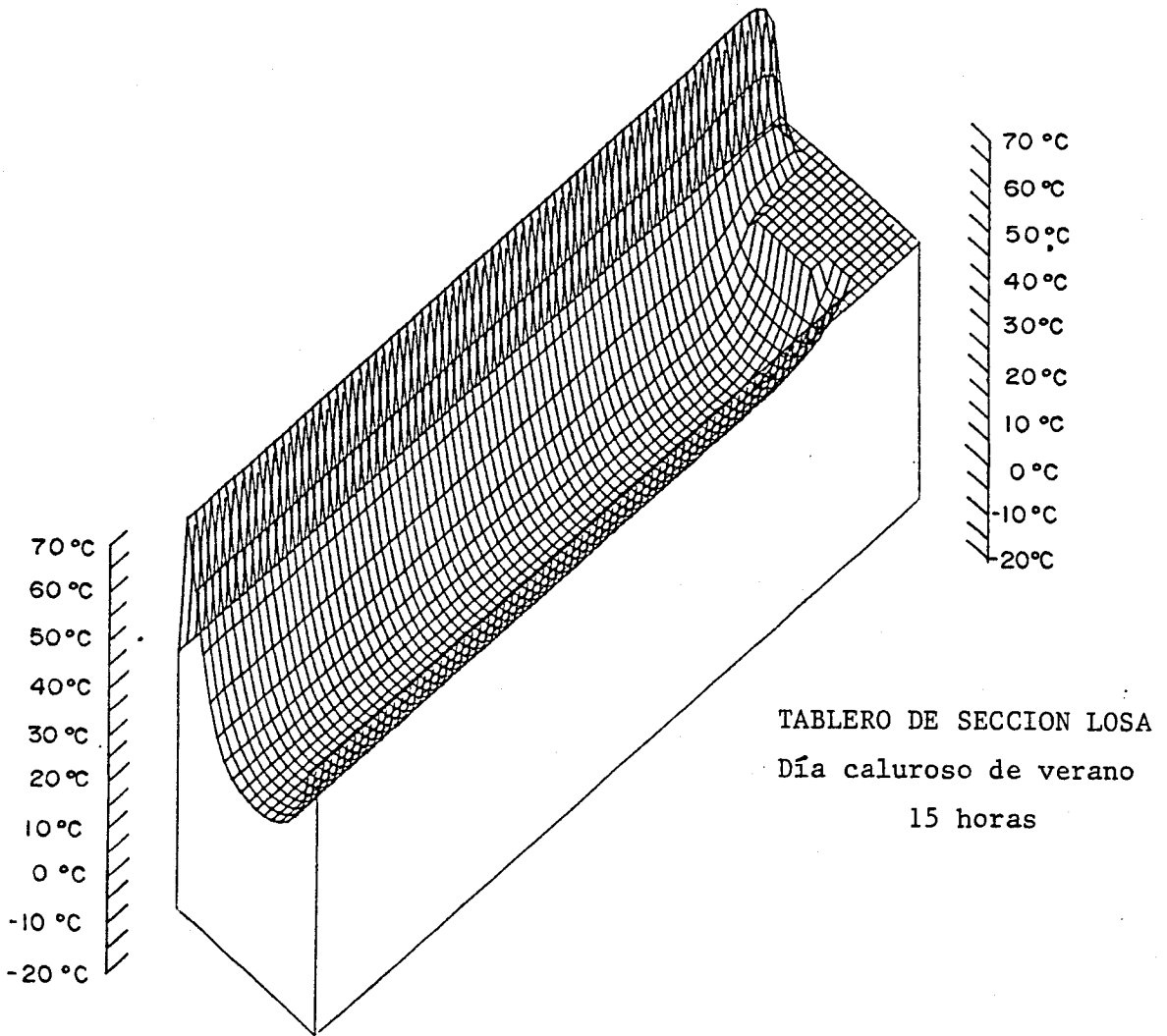


FIG. 7.95

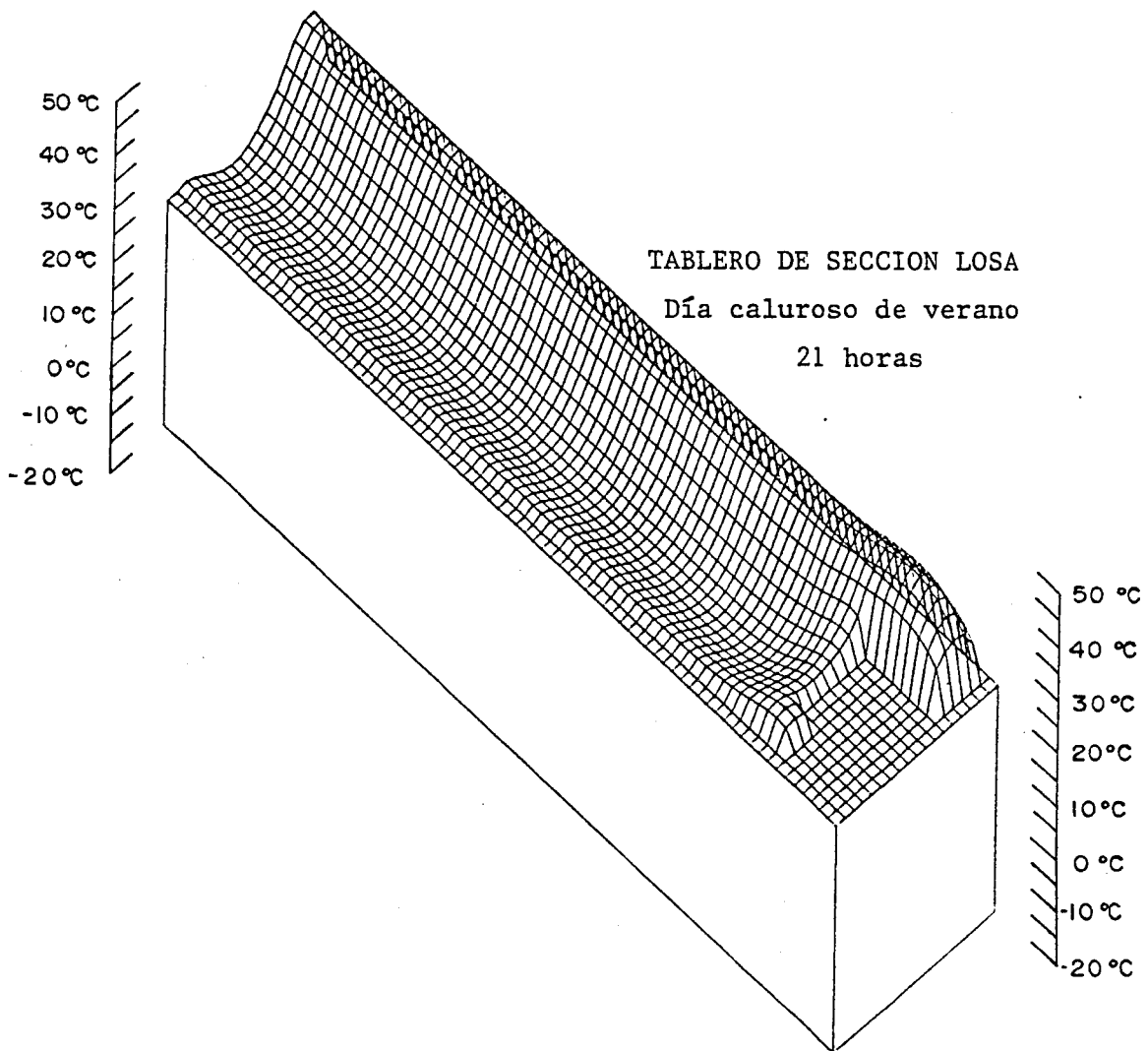


FIG. 7.96

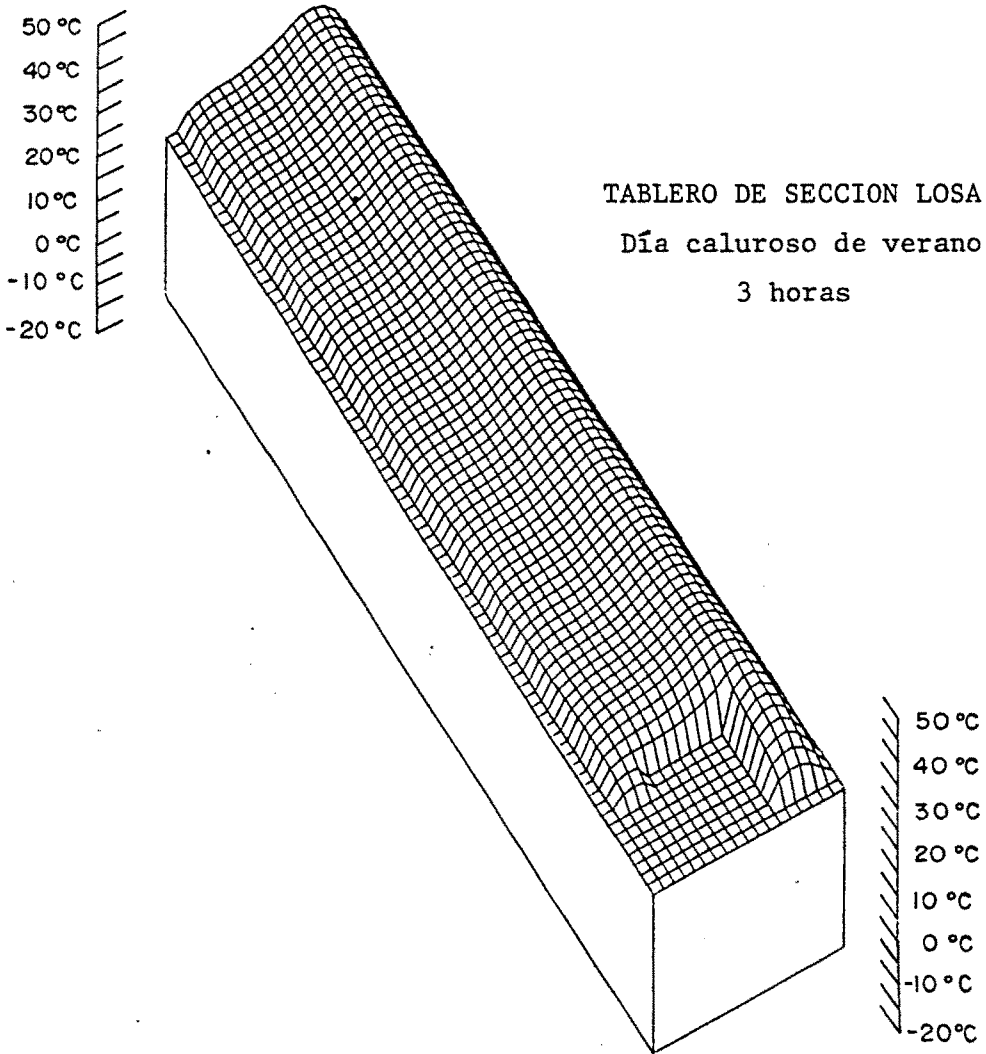


FIG. 7.97

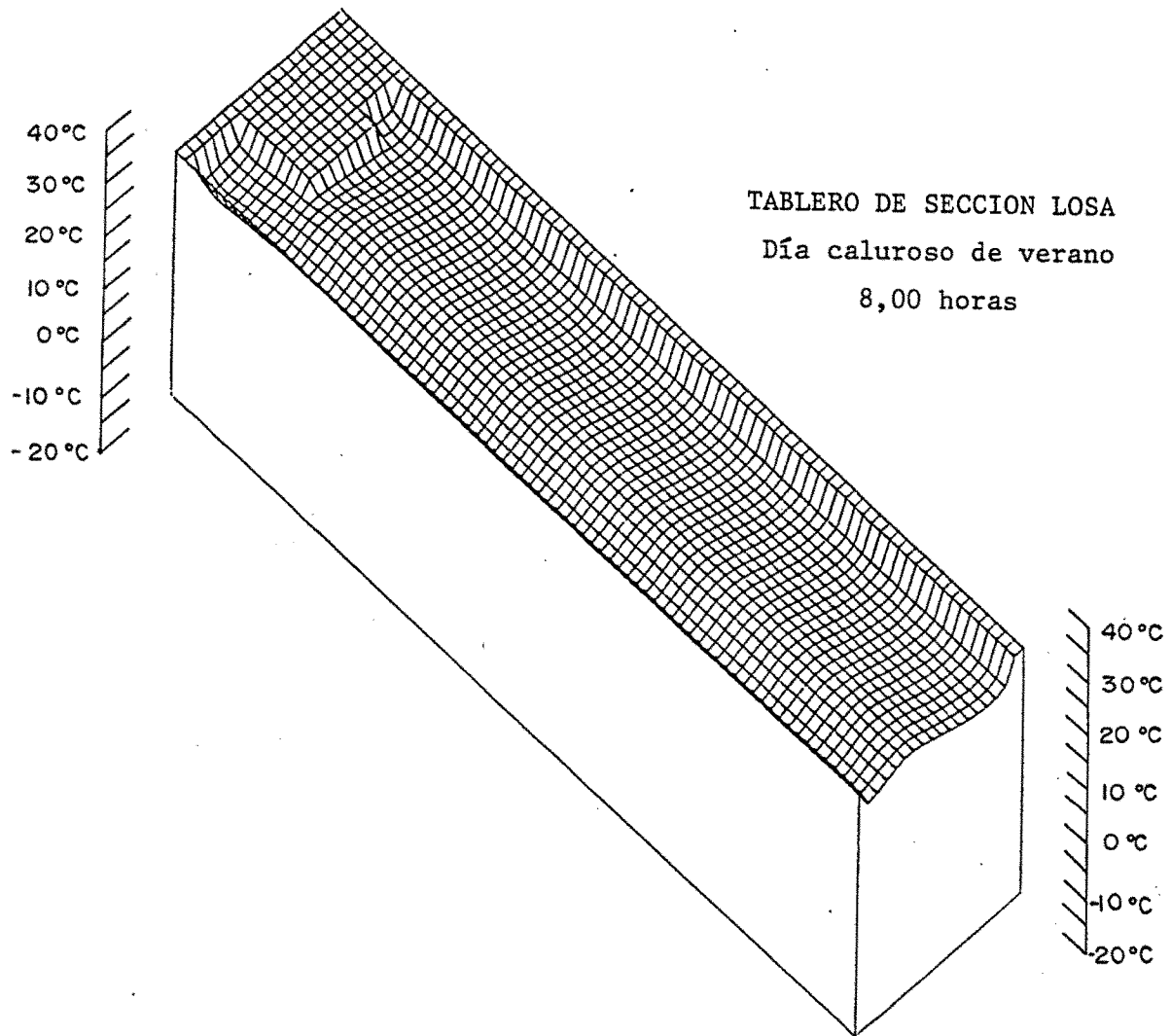


FIG. 7.98

Se la ha diseñado de forma que tenga una geometría irregular tratando de evitar el flujo vertical en el borde y poder definir de esta forma hasta donde llega esta influencia del borde.

El resultado del análisis bidimensional se puede examinar en las figuras 7.95 a 7.98. El lado de la retícula de cálculo es de cinco centímetros. Se comprueba que en todos los casos la influencia del borde lateral de la losa no es superior a 0,50 ó 0,60 ms y que, exceptuando esta zona en la que, por otra parte la diferencia es muy pequeña, el flujo en la losa es totalmente vertical.

El contraste con el caso de losa calculada exclusivamente mediante flujo unidimensional se efectúa en la figura 7.99.

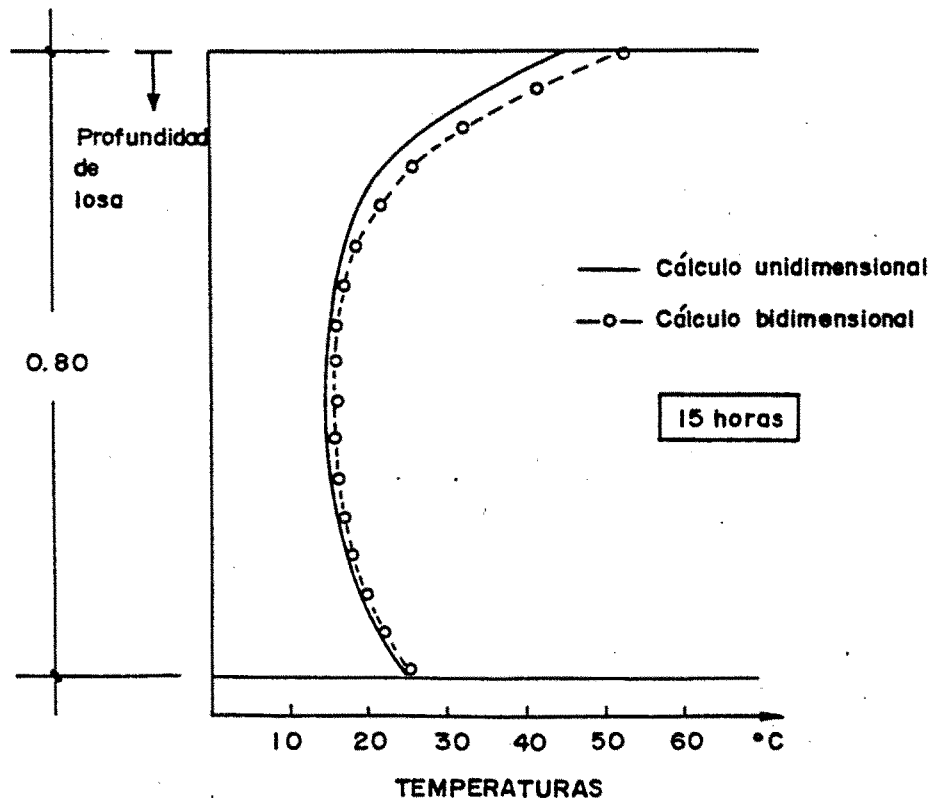


Figura 7.99

Deberá tenerse en cuenta que las condiciones atmosféricas no se consideran de igual modo en ambos tipos de cálculos, ya que, por ejemplo la temperatura en el caso unidimensional se considera mediante una ley triangular y en el caso bidimensional mediante una ley senoidal. Además en el caso unidimensional no se considera pavimento asfáltico sino una ligera capa negra de absorción de radiaciones solares, mientras que en el caso bidimensional se ha considerado un espesor de pavimento asfáltico de 5 cm. Pryestley (3), efectuó un estudio comparativo sobre la influencia del espesor de pavimento en la distribución de temperaturas y obtuvo una diferencia entre 7°C y 10°C en la superficie del tablero, siendo mayor en el caso de pavimento que cuando no existía, además la diferencia crece con el espesor de pavimento. Este resultado queda perfectamente contrastado en la figura 7.99 y por tanto, se da por aceptable la diferencia en dicha figura.

La definición de las curvas representadas en la figura 7.99 sugiere la definición de un diagrama de temperaturas para el cálculo térmico de un puente losa.

El tanteo de ajuste, efectuado con diferentes curvas de definición geométrica sencilla, a la gráfica de la figura 7.99, llega a definir una parábola de quinto grado, según la figura 7.100, que se ajusta perfectamente al diagrama en la parte superior y central, y sumado a él, en la zona inferior un triángulo de altura 0,20 metros y base de aproximadamente 10 grados centígrados.

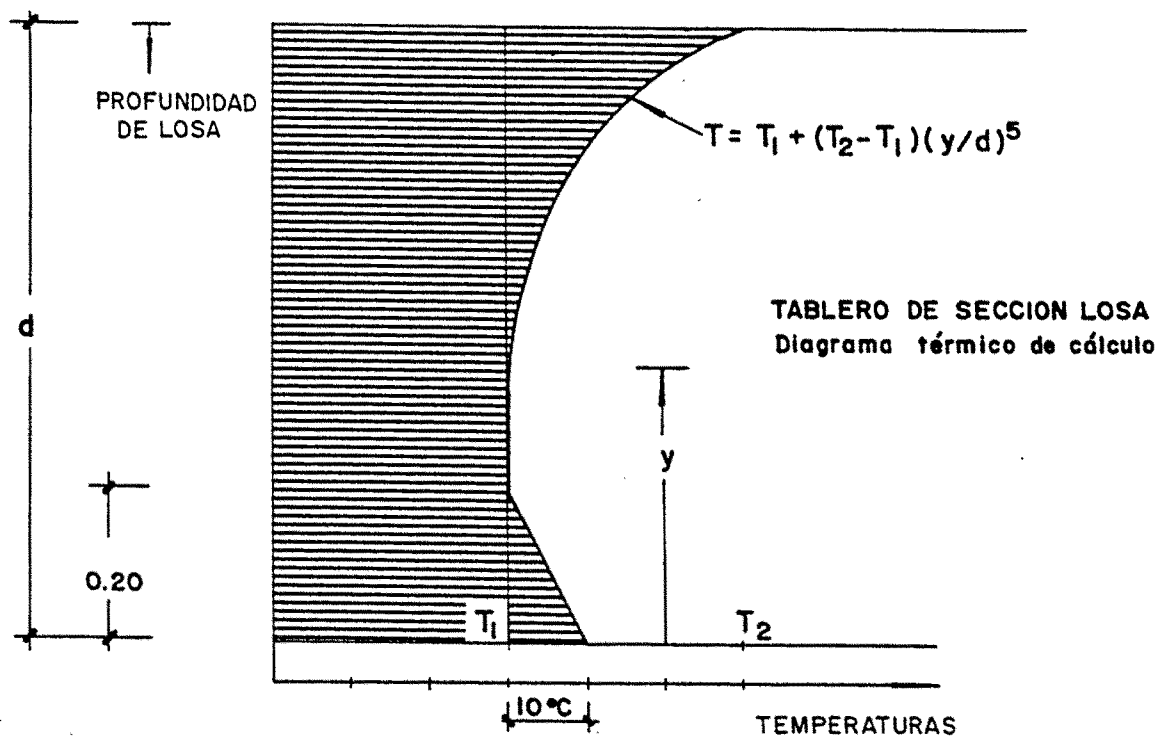


Figura 7.100.

Una solución muy parecida fué encontrada también por Priestley (3) con una parábola de 5° grado en la zona superior, pero el triángulo inferior muy inferior.

Los valores de T_1 y T_2 de la gráfica 7.100 deberán ser obtenidos para cada caso según las condiciones térmicas ambientales de cada puente según se indica en el capítulo 4.

7.3.3. PUENTE DE SECCION CAJON

La relación entre los dos tipos de análisis térmico efectuado al caso de puente de sección cajón, se puede deducir del examen o análisis de las gráficas 7.16 a 7.27 en el caso de flujo unidimensional, y las gráficas 7.63 a 7.66 y 7.75 a 7.78 para el caso de análisis bidimensional.

Las pequeñas diferencias que se aprecian entre ambos se deben a que las condiciones ambientales son diferentes, en especial, la distribución de temperaturas triangular en el caso unidimensional y la distribución senoidal en el caso bidimensional. También se debe al pavimento bituminoso del cálculo en dos dimensiones, que no se considera en el caso de flujo vertical.

CAPITULO VII

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- (1) EMERSON, M. "The calculation of the distribution of temperature in bridges". Departement of the Environment. TRRL. Report LR561. Crowthorne. England, 1973.
- (2) FALKNER. Contribution al Task Group. "Thermal Effects". II Comisi6n CEB. Budapest. Junio, 1980.
- (3) PRVESTLEY, M.J.N. "Design thermal gradientes for concrete bridges". New Zealand Engineering. Vol. 31. Part 9. pp. 213-219. Septiembre, 1976.