

"EFECTOS TÉRMICOS EN SUPERESTRUCTURAS"

por

Ing. Civil Justo A. Segura Godoy

RESUMEN

Se pasa revista al uso de distintas disciplinas que intervienen en la solución de problemas térmicos entre los que se encuentran las climatológicas, termodinámica, aplicación matemática y aspectos estructurales.

Se insertan mapas de las acciones térmicas, planteo de resolución matemática, se definen gradientes de temperatura y se muestra un ejemplo numérico aclaratorio.

Finalmente se agrega un cuadro resumen de los valores y gradientes más destacados de algunas normas o guías internacionales en uso en 1987 a efectos de su posible utilización en distintas zonas de la Argentina.

ESECTOS TERMICOS EN SUPERESTRUCTURAS

INTRODUCCION

Los efectos térmicos en las construcciones son conocidos fundamentalmente por su aspecto visual: fisuras en los edificios; en los pavimentos; en los diques de hormigón y en los puentes. Los remedios usuales son las consabidas llaves en los muros; los rellenos plásticos en los pavimentos; el hormigonado en colados parciales (bloques) en los diques y juntas en los puentes.

Quizás el más directo, cuando se puede, es el despiece de la estructura. Para ello es necesario saber evaluar las causas del problema y su magnitud. No significa que esa sea una solución de compromiso.

Otras perturbaciones de origen térmicas, no detectables visualmente y que revisten capital importancia son las tensiones internas y deformaciones que en suma son las causantes potenciales de la fisuración.

Esas tensiones autoinducidas o por restricción no son tan intuitivas y se aclararán, así se espera, a lo largo de esta exposición. Se generan tensiones cuando las deformaciones son restringidas o impedidas -interna o externamente.

RAZON DE LA IMPORTANCIA DEL TEMA

Si las fisuras detectadas y medidas son del orden de magnitud o mayores que las tolerables en flexión ya indican de por sí que la durabilidad está cuestionada, exige su estudio y su cobertura.

- Ya que los efectos térmicos en las superestructuras están insuficientemente reglamentados se debe apelar a estudios particulares.

Por fin debe notarse que suelen presentarse los efectos térmicos coetáneamente con tensiones de sobrecargas móviles, y deformaciones diferidas en las que las primeras juegan un papel desencadenante en la fisuración.

OBSERVACIONES DIRECTAS EN PUENTES

(Ver cuadro de Temperaturas y Fisuraciones)

1. - Argentina:

- a) - En Entre Ríos
Puente de 3 x 30,00 m isostático, prefabricado-postesado

Feb/85

- Medición en la superficie del tablero

8 hs	16°C	> difer. sup. 17°C
16 hs 45'	33°C	

- En el talón

8 hs 30'	19°C	> difer. 5°C
16 hs 45'	24°C	

- Máxima diferencia registrada entre ambas caras 9°C

- Rotaciones entre extremos

$$\theta = \phi \times L = 0,1743 \times 10^{-3} \times 30 = 2,9 \times 10^{-3} \text{ rad. (medida)}$$

Contraflecha de 8 h a 16 hs 45'

11 mm (medida)

Estas mediciones y sus consecuencias impusieron la necesidad de estudiar el caso, lo que dio por resultado que, fuera de las decisiones adoptadas, en obra, publicáramos un artículo en la Revista "Carreteras" N° 163, año 1985 -con los Ing. L. Requena y C. Cotignola- donde puede verse una aplicación de la norma Neocelandesa.

- b) - Posteriormente en Orán - Salta en septiembre/87 se midieron en vigas prefabricadas-postesadas (sin losa) de 25,00 m de luz y 1,35 m de altura para diferencias de temperatura entre 8 h y 16 h. Contraflecha entre 7 y 10 mm lo que significó rotaciones

-3

entre extremos entre $2,24 \times 10^{-3}$ y $3,2 \times 10^{-3}$ rad.,
Comparables con las de Entre Ríos.

- c) - En Tucumán en un puente 8 x 28,00 m doble viga másica sobre el Río Salí se observaron importantes fisuras en las zonas de apoyo de vigas continuas. La fisuración

puede haber sido la suma de elevadas tensiones propias y de temperatura.

2. - En Alemania:

Puente de Jast - viga cajón luces 23-32 m

Fisuras en el alma horizontales 5 mm.

3. - En U.S.A.:

Estado de Colorado

Luces 38-58-38 m viga cajón

Fisuras 3 mm

Fisuras entre segmentos 6 mm

Es bueno dejar sentado que los efectos de temperatura no son en general de índole catastrófica pero si afectan a la durabilidad y apariencia de las estructuras y son inadmisibles.

ACCIONES CLIMATICAS

Las principales acciones climáticas son la radiación solar, el intercambio de calor por convección y el viento que modifica la acción de esta última.

Las acciones climáticas se hacen sentir sobre las superficies superior, lateral e inferior de la superestructura, en fin a lo largo de la interfase estructura-medio ambiente.

La radiación atmosférica así como la irradiación de la estructura y del suelo si bien tienen influencia no son tan determinantes.

RADIACION SOLAR

Se deben distinguir los valores

- 1) de la intensidad instantánea (G) dada en w/m^2 ; que varía casi sinusoidalmente hora a hora entre la salida y puesta del sol y que raramente sobrepasa los $1000 w/m^2$.
- 2) la radiación global diaria (G) medida en wh/m^2 , que varía mes a mes, según el lugar puede ser consultada en mapas regionales con máximos de $10000 wh/m^2$.

La radiación instantánea (G) tiene su máximo (G max) a medio día.

Con el valor de (G_{DT}) la radiación global diaria se calcula la máxima intensidad si se conoce la latitud del lugar y consiguientemente la duración del día solar. Con el valor de G_{max} obtenido se entra hora a hora en la ecuación del balance térmico, como se verá más adelante. La opacidad atmosférica modifica los valores de la radiación solar.

CONVECCION

El intercambio por convección responde a la fórmula siguiente

$$Q_c = h_t (T_s - T_a)$$

Q_c = pérdida o ganancia por convección

T_s = temperatura superior

T_a = temperatura del aire

El coeficiente (h_t) de convección varía drásticamente con la velocidad del viento.

Para $w = 0$ m/s	$h_t = 19$ w/m ² C
10 "	$h_t = 43$ "

Por tanto en la ecuación de balance térmico de donde sale la temperatura de borde se puede observar algo de capital importancia:

Para una radiación instantánea (G) la superficie se calentará más cuando la convección sea mínima, es decir cuando (h_t) sea mínima (baja velocidad del viento o calma) y la diferencia de temperatura en la superficie y del aire también sea mínima es decir un día de verano sin viento y cielo claro.

En U.S.A., Europa y Nueva Zelandia se aconseja una capa asfáltica (black-top) sobre la estructura a efectos de aminorar la temperatura superficial.

Si bien la absorbencia del black-tops es de 0,80 contra 0,65 del hormigón su difusividad es notablemente menor.

Se analizan a continuación mapas de radiación máxima global diaria.

El de U.S.A. muestra que la curva de isorradiación se mueven más bien según los meridianos por la influencia que ejercen las montañas del Oeste, la planicie y la costa Este (del Este con 5400 wh/m² a Oeste con 7800 wh/m²).

Se delimitan tres zonas que se utilizaron para la guía o normas de T.R.B./85.

El de Europa muestra curvas que van de 8000 wh/m² en Inglaterra, a 10000 wh/m² en Grecia, siguiendo en cierto modo los paralelos con características locales de 7500 wh/m².

Nótese bien que las consideraciones que anteceden se refieren particularmente al verano. En el caso del invierno, la noche o latitudes sud importantes, la situación se invierte totalmente y merece un estudio aparte.

ECUACION DIFERENCIAL DE TRASMISION DE CALOR

La ecuación diferencial por la que se rige el fenómeno y de la que puede obtenerse el perfil de temperatura (gradiente) en cada instante es la siguiente:

$$a \cdot \frac{\delta^2 T}{\delta x^2} = \frac{\delta T}{\delta t}$$

T = temperatura del punto

x = profundidad a partir de la cara inferior

t = tiempo

a = constante de difusividad que depende de las propiedades del material

$$a = K/c \cdot d$$

K = coef. de conductibilidad (1,4 w/m°C)

c = calor esp. (1028 w/Kg°C)

d = densidad (2400 kg/cm³)

$$a = 0,6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

La resolución de la ecuación diferencial de 2º orden no es de fácil manejo, por lo que se utiliza su desdoble en diferencias finitas para la solución a mano, o por elementos finitas por un adecuado programa de computación.

De cualquier manera que se intente es necesario precisar las constantes de integración o condiciones de borde que no son otras que las temperaturas en las caras en función del instante considerado.

La ecuación en diferencias finitas se transforma en:

$$a \cdot \frac{\delta^2 T}{\delta x^2} (T_{i-1} + 2T_i + T_{i+1}) + T_i = T_i^I$$

- Las condiciones de borde se establecen por un balance térmico.

calor recibido = calor restituído + calor conducido.

$$r I = h_t (T_i - T_a) + K \frac{(T_{i-1} + T_{i+1})}{2 \delta x}$$

r = absorbencia = 0,65

K = coeficiente de conductibilidad

El procedimiento iterativo para la resolución puede ser consultado en la bibliografía y cae fuera del alcance de este trabajo.

El resultado es un cuadro de valores en función de la hora y del punto en cuestión.

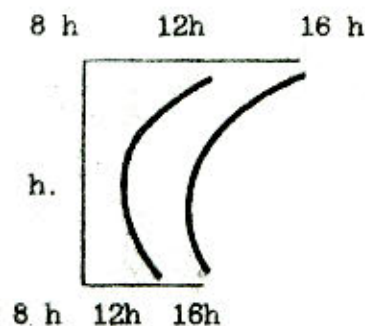
El calor recibido es fundamentalmente por radiación solar.

El restituído es la pérdida por convección cuando la temperatura de la cara es superior a la del aire.

El calor conducido depende de la difusividad del cuerpo.

Por otra parte, en última instancia, para simplificar se establecen reglamentos o guías, lo que no se ha hecho en la Argentina hasta el presente. El cálculo matemático del gradiente queda relegado a casos especiales que no quepan en la normativa.

Finalmente, puede apreciarse, por todos los estudios teóricos y experimentales en Nueva Zelandia, Inglaterra, España, Estados Unidos, Australia, Alemania, Italia, Francia, Dinamarca y Suecia entre otros que el gradiente tiene una forma general instantánea similar a la siguiente:



PERFIL DE TEMPERATURA

El perfil o gradiente es la curva que resulta de unir los valores instantáneos de la temperatura en todos los puntos de la sección, calculados matemáticamente o aproximados por los reglamentos.

Es necesario dejar sentados dos premisas fundamentales:

- 1º Las secciones en su deformación por acciones térmicas deben mantenerse planas (Navier-Bernouilli).
- 2º Los efectos térmicos se miden por diferencias de temperatura, en cada punto, entre dos tiempos definidos.

A continuación se analizan cualitativamente tres gradientes

- a) Diferencia de temperatura constante en cada punto a lo largo de la sección

8 h δt 16 h



para una longitud L

$$\delta L = \delta t \times 10^{-5} \times L$$

Se produce dilatación o contracción sin rotación ni curvatura.

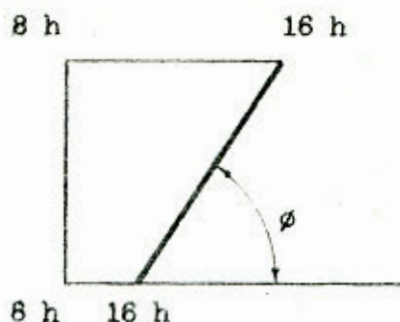
Si no se restringe el corrimiento no hay tensiones, vale la pena saber que si se impide la deformación el esfuerzo alcanza para $\delta t = 20^\circ\text{C}$.

$$\sigma = 10^{-5} \times 20 \times 3 \times 10^6 = 600 \text{ t/m}^2$$

y que no depende de la longitud de la pieza.

Cualquier tramo de puente ejerce una presión insostenible.

b) Perfil de temperatura rectilíneo

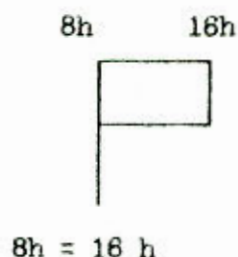


La sección a las 8 h era plana a las 16 h deberá mantenerse plana (Navier-Bernoulli).

La sección habrá girado ϕ rad/m.

- Cada sección adyacente sumará su rotación ϕ a la acumulada anterior, lo que significará una curvatura general.
- No habrá tensiones porque la deformación de cualquier fibra no dificulta la de los adyacentes. Cada una se deforma con su propio δT resultando una deformación general plana que no se ve impedida en ningún punto.

c) Perfil lineal parcial



- La sección a las 8 h era plana a las 16 h no puede ser quebrada.
- Los puntos sin variación de temperatura (si mantienen su temperatura inicial de las 8 h) se opondrán a la deformación general producida por el perfil de temperaturas generando tensiones en sí misma y en la zona del perfil. Por tanto las secciones continuarán planas, girarán, habrá curvatura de la pieza y autotensiones. Se revisará cuantitativamente este fenómeno con un ejemplo numérico.

EJEMPLO DE APLICACION

(ver cuadros - 4 fs)

Se ha elegido un caso real. Varios tramos isostáticos de 30,00 m con las características indicadas, con las que se podrán intentar 3 alternativas constructivas.

- 1 - Interponer entre ellas juntas.
- 2 - Establecer continuidad de tránsito, pero no estructural, mediante una losa ad-hoc.
- 3 - Establecer continuidad estructural para aprovecharla bajo la acción de las sobrecargas móviles.

Se estudia el efecto de la temperatura en el primer y tercer caso, aunque el segundo que es el de mayor actualidad puede ser deducido del planteo para los anteriores.

Como se ve se adopta una diferencia de temperatura de 30°C y un gradiente lineal parcial a efectos de que los cálculos numéricos no incluyan integraciones engorrosas y surja claro el concepto del problema.

En esencia se demuestra como se corrigen o compaginan las deformaciones producidas por el gradiente lineal parcial con el equilibrio final de la sección.

- En un primer paso se calcula el esfuerzo total ideal producido por perfil desequilibrado.
- En el segundo paso se cancela ese esfuerzo normal con las restantes fibras y una resultante exterior nula, apareciendo las primeras autotensiones.
- En el tercer paso se cancelan los momentos flectores internos anteriores con la condición de momento exterior nulo, apareciendo nuevas autotensiones.

De la suma de los tres estados surge el diagrama de dos signos con tensiones de compresión en ambos casos del orden de 480 y 146 t/m² y de tracción en el alma de 338,5 t/m².

Estos últimos pueden ser causantes de fisuras verticales.

- Cuando se unen los tramos isostáticos en una viga continua se imponen restricciones externas mutuas a los giros en los extremos sobre los apoyos centrales y aparecen momentos y tensiones que deben ser sumados a las autotensiones isostáticas.

El diagrama de tensiones completo con los valores del cuadro correspondiente muestran valores de tracción en la cara inferior del orden de 317 t/m² y de compresión en la superior del

orden de 696 t/m².

Ambos esfuerzos son muy de tener en cuenta cuando se combinan con los de la sobrecarga móvil.

- En una viga de tres tramos la fisuración puede aparecer en los apoyos centrales y todo el tramo medio.
- En una viga de dos tramos la zona de mayor riesgo es la del apoyo-central.

Se deja al lector el análisis de los diagramas de postesado en presencia de temperaturas.

Se llama la atención sobre lo comprometido que es el tema de la unión de vigas isostáticas a causa de los efectos de temperatura y tensiones diferidas.

MAPAS

En la Argentina sólo se dispone de mapas de temperatura del aire, faltando los de radiación.

No obstante se puede asimilar la situación nacional a la que de acuerdo con el investigador más se asemeje a los antecedentes recogidos.

Con las acciones climáticas radiación y convección, en especial, se han confeccionado normas o guías.

Se expone un cuadro de normas o guías en uso en distintos países en 1987.

UNA PALABRA ULTIMA:

Los efectos térmicos al ser combinados con los diferidos y las sobrecargas móviles exige la elección de coeficientes de seguridad aparte de los usuales en base a los valores medios y extremos, tenida cuenta de los períodos de retorno.

En este punto existen encuadres dispares en las distintas normas en uso.

BIBLIOGRAFIA

Las fuentes más actualizadas pueden encontrarse en dos importantes trabajos publicados en 1985.

- 1) Por la Transportation Research Board U.S.A. producto de la colaboración en una comisión de alrededor de 50 expertos e Ins-

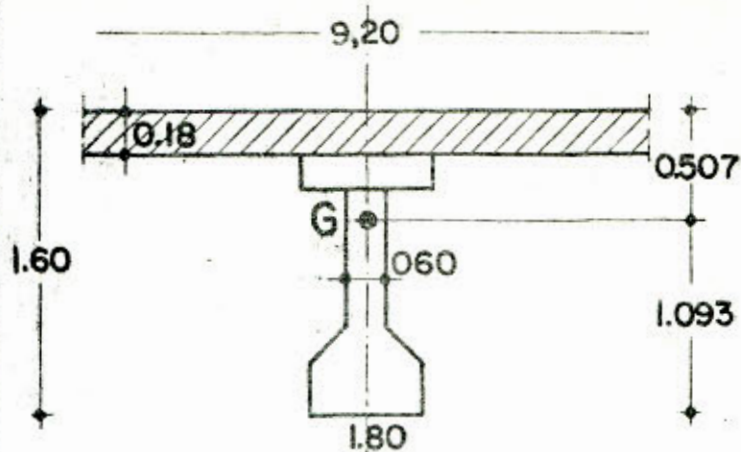
tituciones de primer nivel.

- 2) Por CKB - Commission II Task Group.

Complementadas por:

- 3) El excelente trabajo de Mary Emerson de la T.T.R. de Inglaterra.
- 4) Publicaciones de base cuyo listado puede consultarse en la Revista Carreteras Nº 163/85.

Octubre de 1987.-



$$\alpha = 10^{-5}$$

$$E = 3 \times 10^6 \text{ t/m}^2$$

$$A_f = 1,656 \text{ m}^2$$

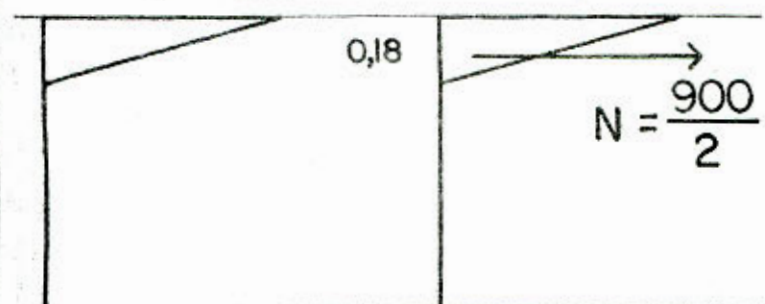
$$A_G = 3,105 \text{ m}^2$$

$$J_G = 0,9416 \text{ m}^4$$

$$t = t_{16h} - t_{8n} = 30^\circ \text{ C}$$

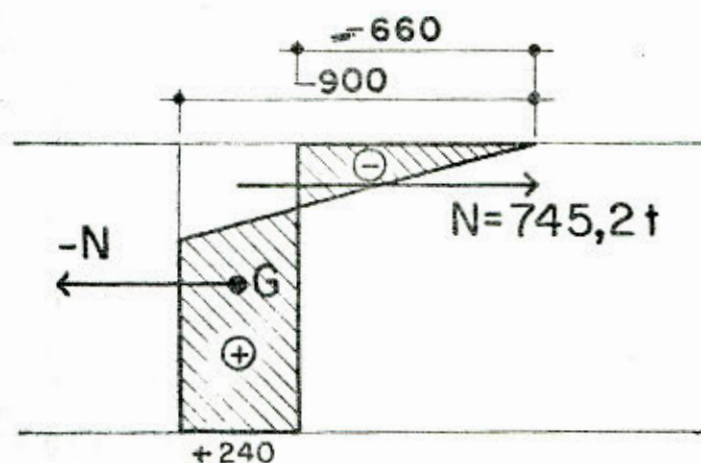
$$\epsilon = \alpha t$$

$$\sigma^o = E \alpha t = 3,10^6 \times 10^{-5} \times 30 = 900 \frac{\text{t}}{\text{m}^2}$$



$$N = \frac{900}{2} \times 9,20 \times 0,18 = 745,2 \text{ t}$$

Fibras independientes

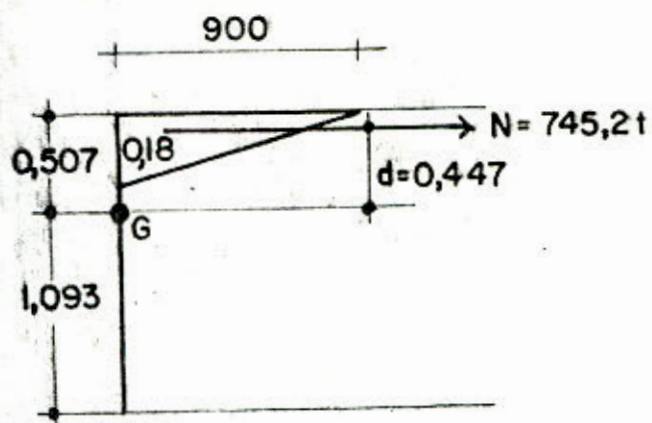


Fuerzas exteriores nulas
cancelar N interiores

$$\sum N = 0$$

$$\sigma^I = 240 \text{ t/m}^2$$

$$\sigma^I = \frac{N}{A_G} = \frac{745,2}{3,105} = 240 \text{ t/m}^2$$



$$N \times d - M_i = 0$$

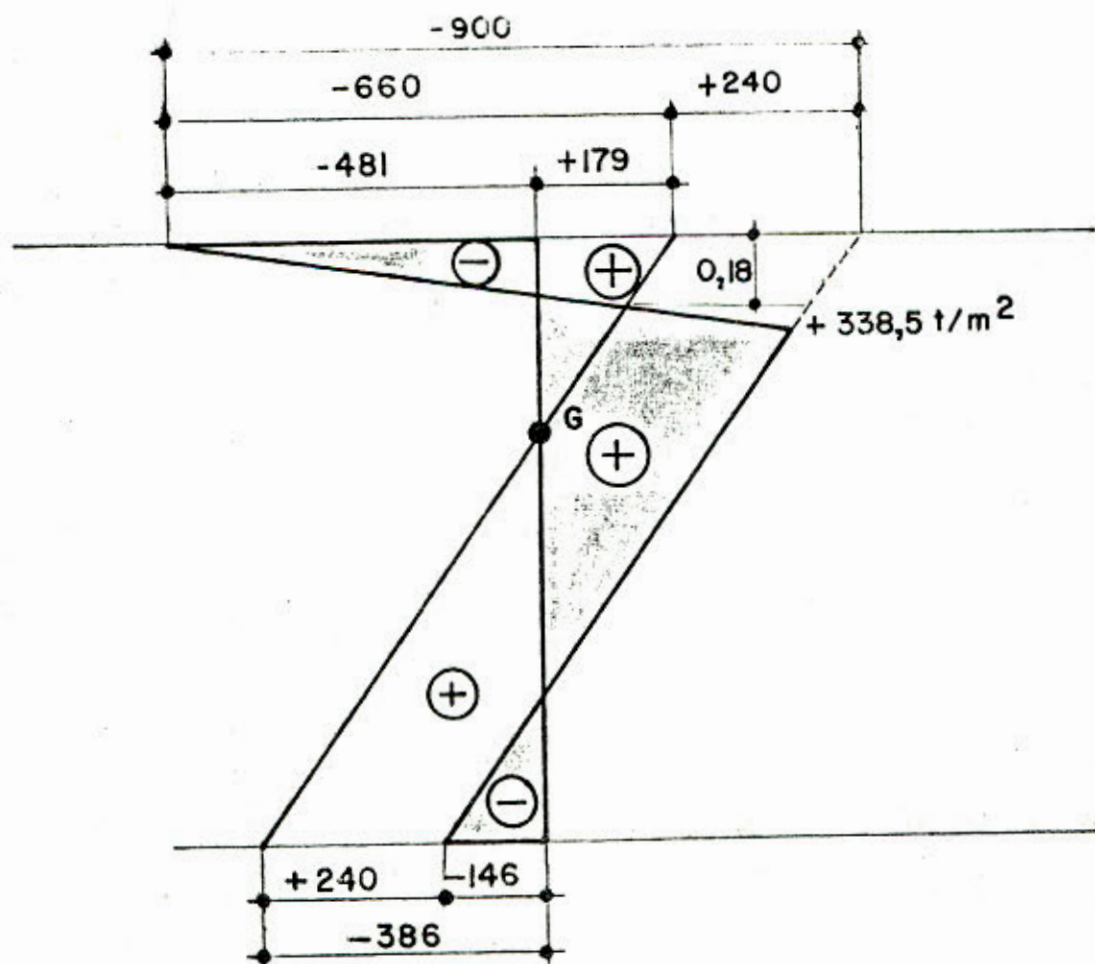
$$N \times d = 745,2 \times 0,447 = 333,1 \text{ tm.}$$

$$\sigma_{\text{sup.}}^2 = \frac{333,1}{0,9416} \times 0,507 = 179 \frac{\text{t}}{\text{m}^2} \quad (+)$$

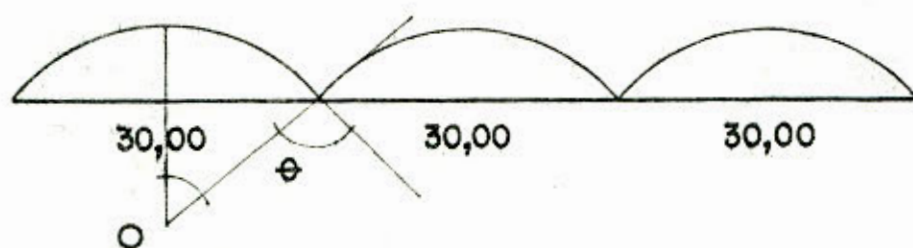
$$\sigma_{\text{inf.}}^2 = \frac{333,1}{0,9416} \times 1,093 = 386 \frac{\text{t}}{\text{m}^2} \quad (-)$$

Momento exterior nulo
Cancelar M interior

$$\Sigma M = 0$$



VIGA CONTINUA 3 x 30,00 m.



$$\theta = M / EJ = \frac{333,1}{3 \times 10^6 \times 0,9416} = 0,1179 \times 10^{-3} \text{ m}$$

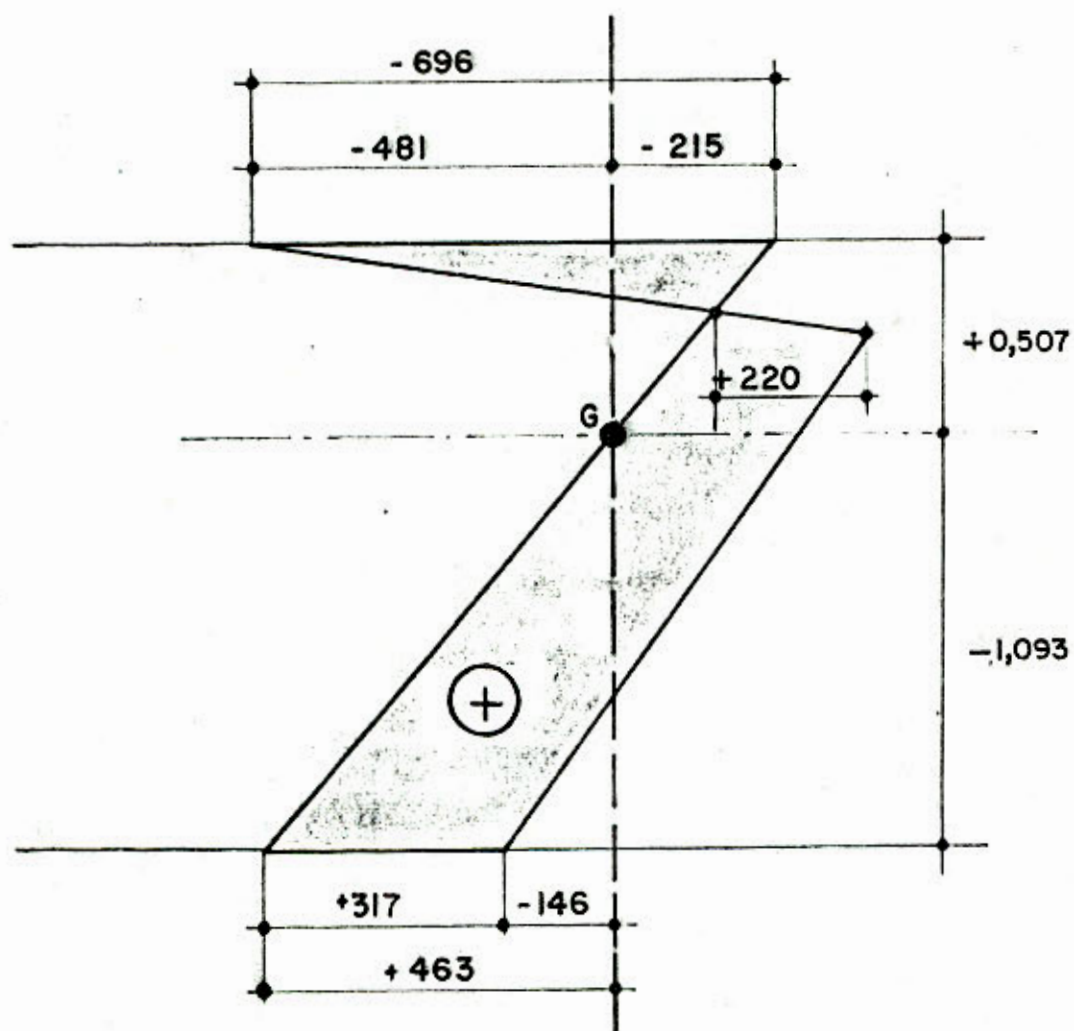
$$\theta = 0,1179 \times 10^{-3} \times 30 = 3,53 \times 10^{-3}$$

$$M = \frac{6}{5} \frac{EJ}{l} \theta = 399 \text{ tm.}$$

$$\sigma_M = \frac{399}{0,9416} y_g$$

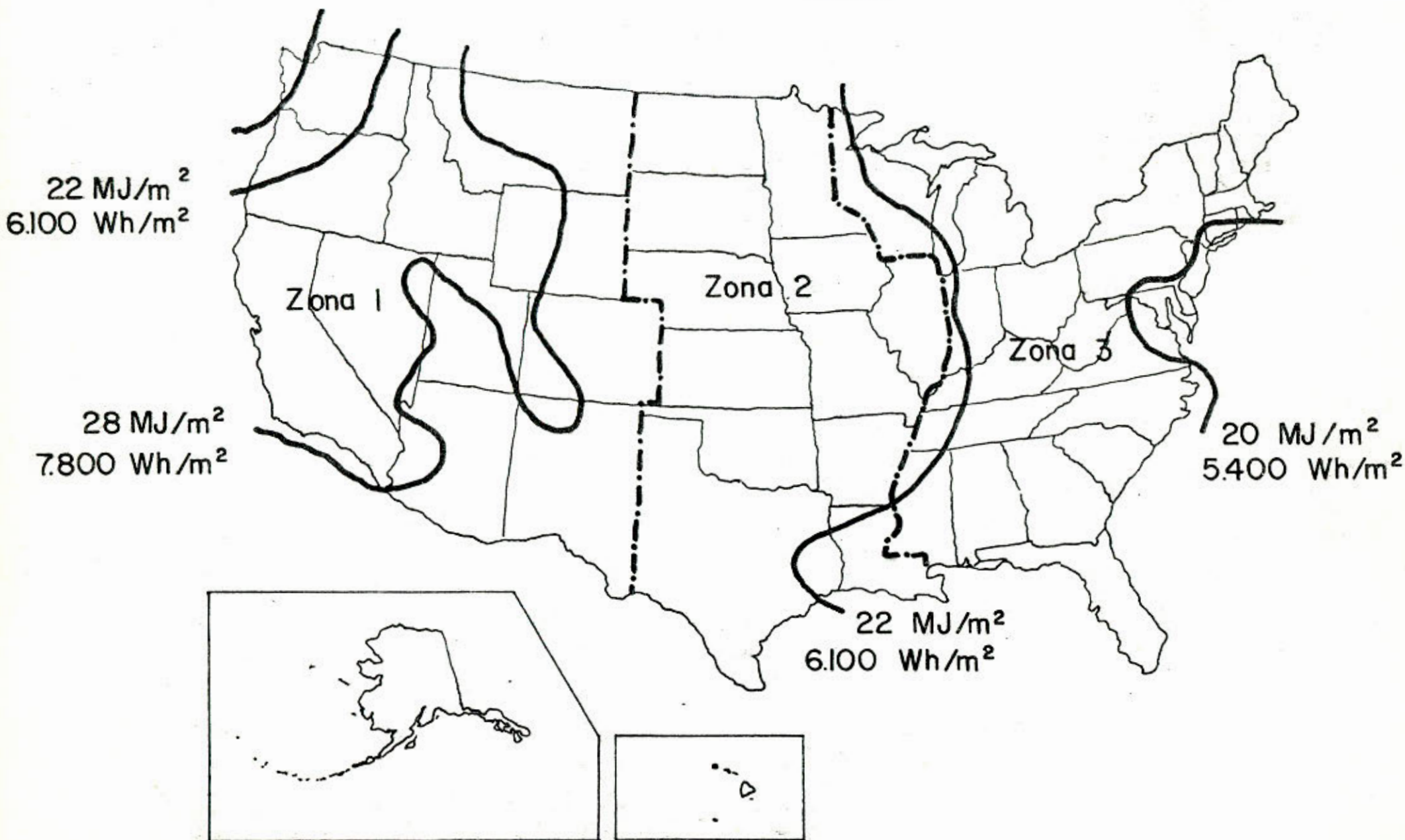
y_g	σ_t	σ_M	σ_{t/m^2}
+ 0,507	- 481	- 215	- 696
+ 0,279	+ 338	- 118	+ 220
- 1,093	- 146	+ 463	+ 317

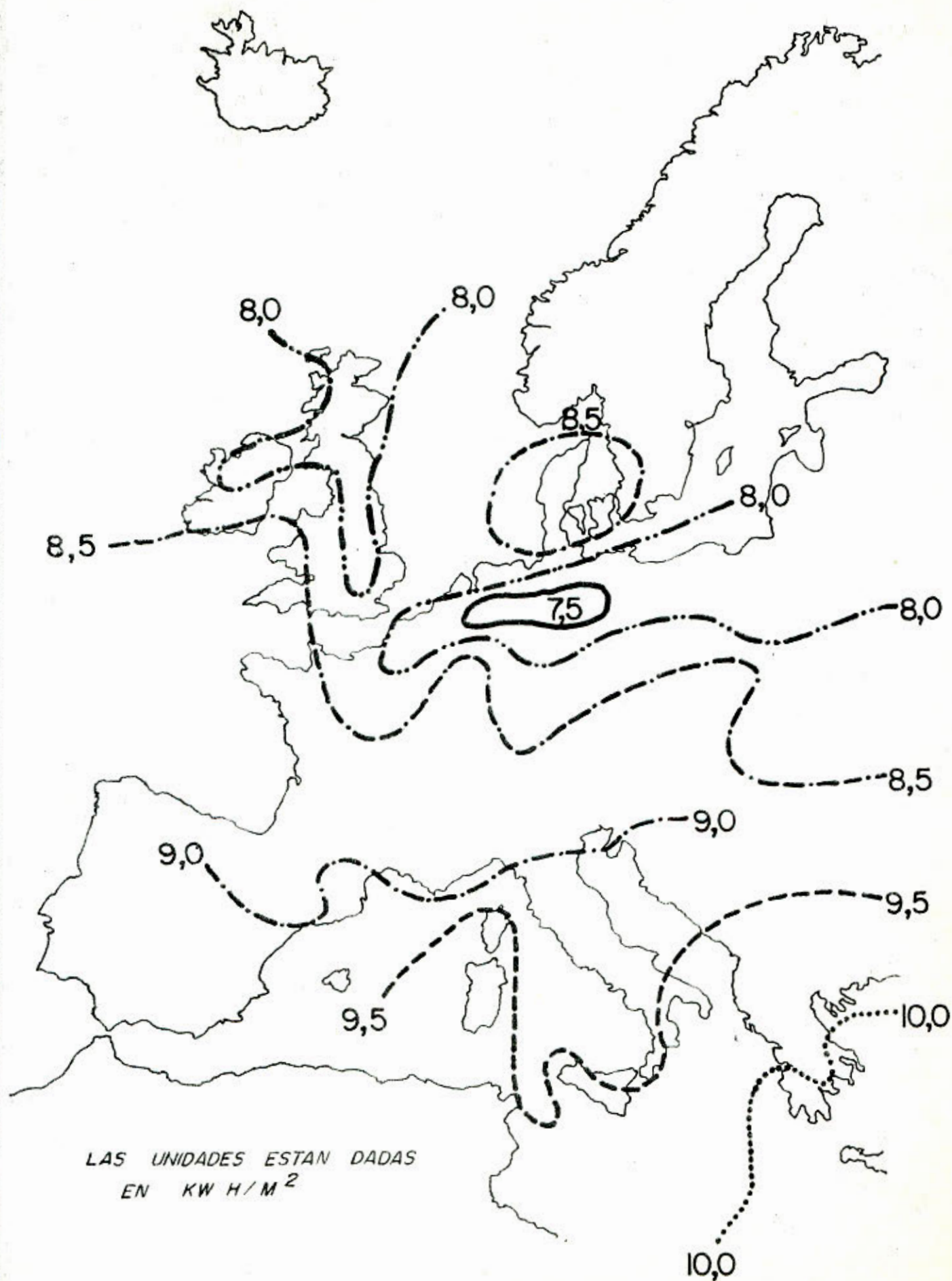
4

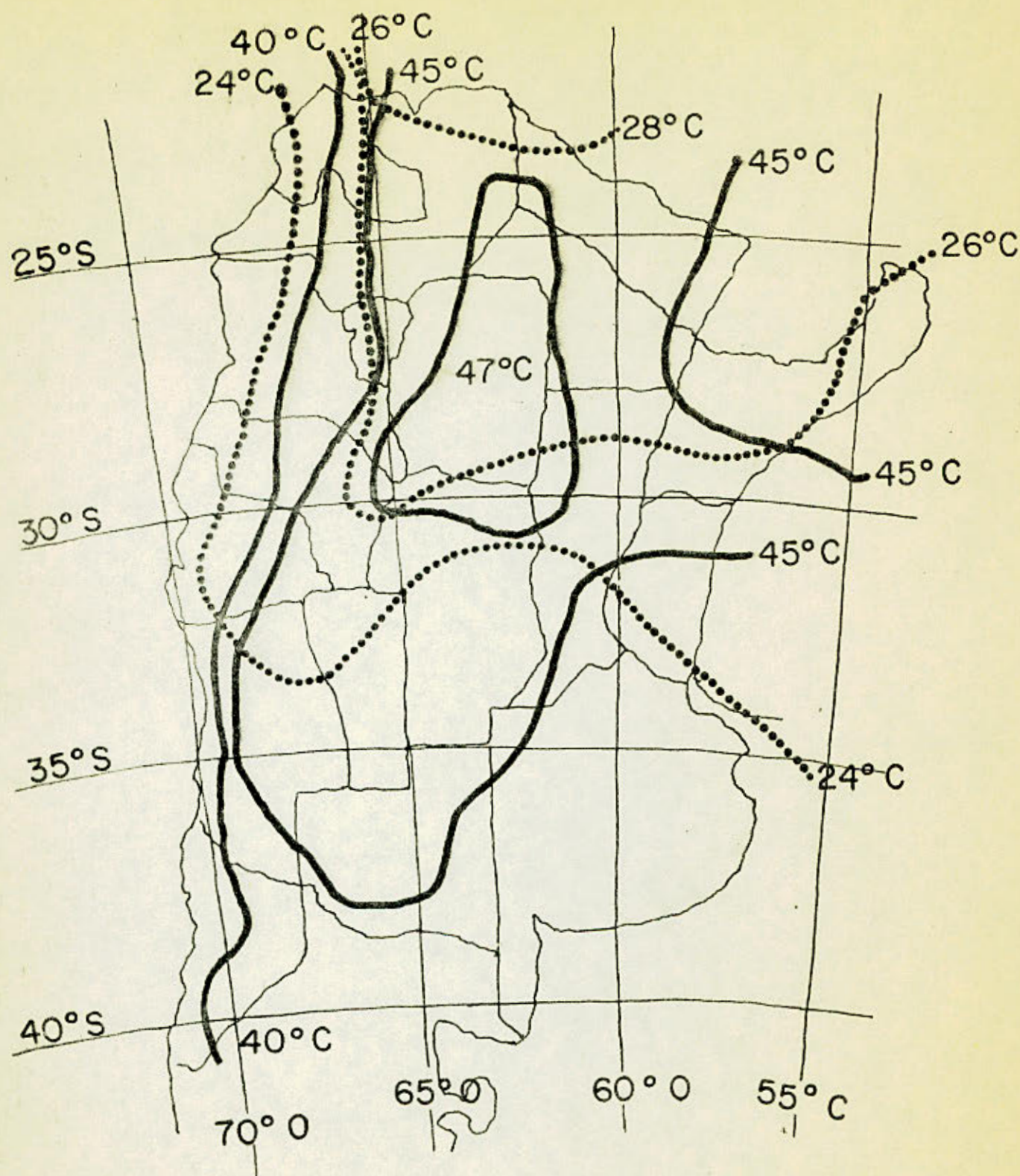


AUTOTENSION MAS RESTRICCIONES

MAXIMA RADIACION SOLAR CALCULADA

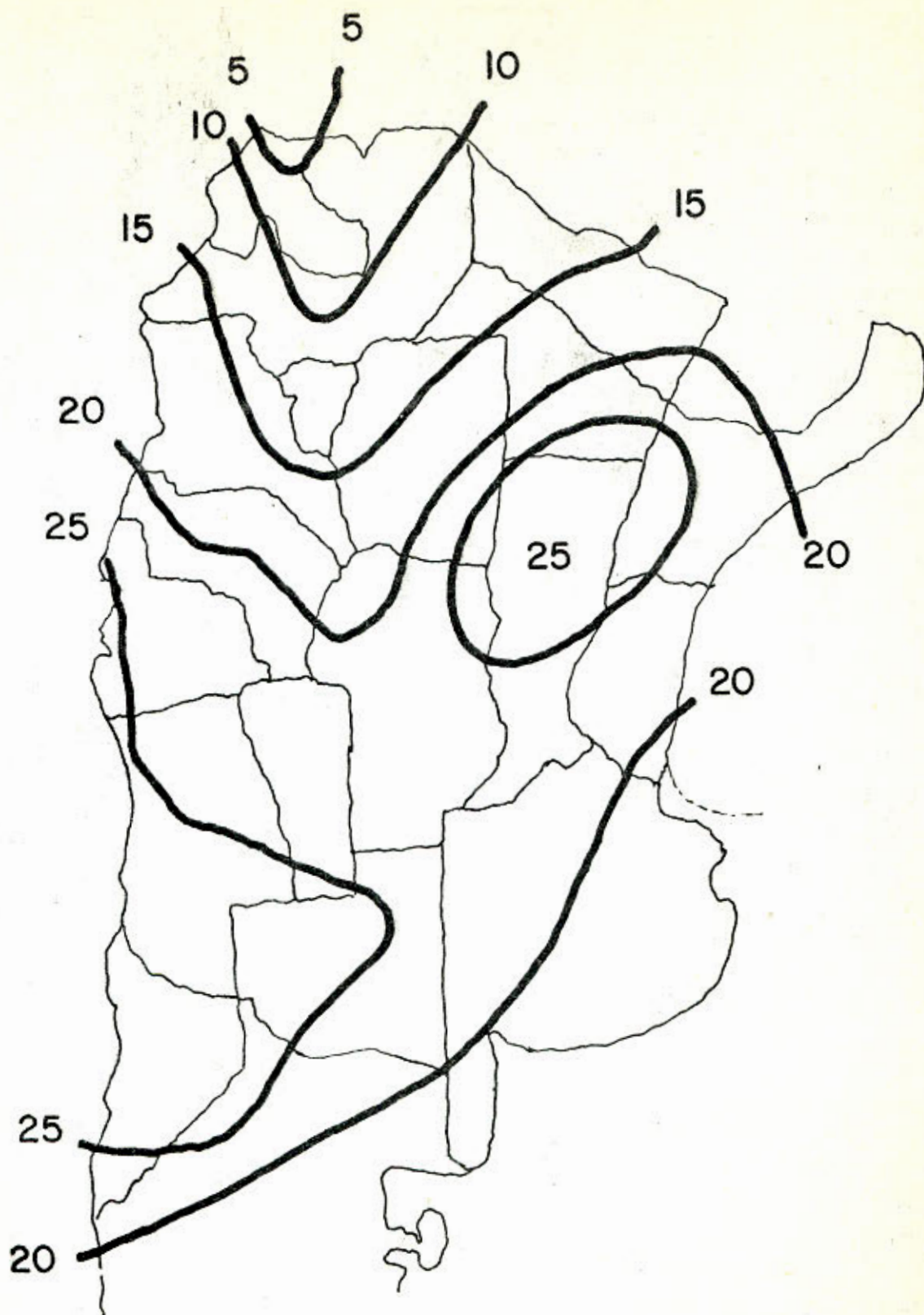






—— Temperatura maxima absoluta ($^{\circ}$ C)
1901 - 1950

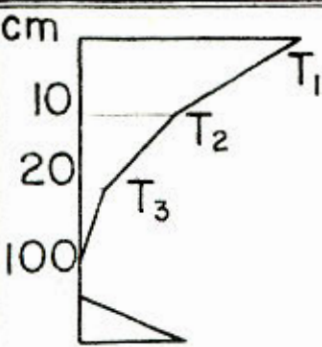
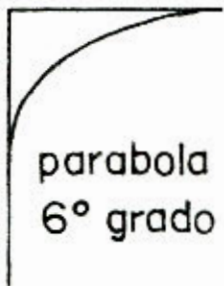
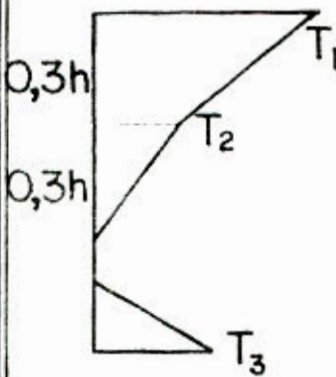
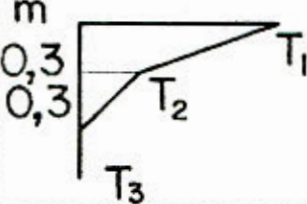
..... Temperatura media febrero



Número de días con cielo claro (verano) - 1901-1948
nubosidad $\leq 2 / 10$

CUADRO DE TEMPERATURAS Y FISURACION

UBICACION	LAT.	MAX SUP °C	DIFERENCIAS °C		TIPO VIGA	LUCES (m)	ANCHO FISURAS
			Superficial	Sup - inf.			
ARGENTINA-E.Rios / 85	34	33,0	17,0	9,0	T	30,00	—
ALEMANIA-Jast Br/65		—	—	—	Cajon	23 - 32	Horizontal 5mm Desplazamiento 2 mm
U.S.A.							
Pensylvania	40	47,5	28,3	23,9	Cajon	36,88	—
Virginia	37	36,6	—	—	—	—	—
Texas	30	—	—	19,4	Losa	—	—
Colorado	40	45,5	17,7	12,2	Cajon	38-58-38	entre segm. 6mm 3mm.
NUEVA ZELANDIA	43	—	29,0	—	—	—	—

PAIS	ESQUEMA	DIFERENCIA DE TEMP.																
U.S.A. Transp. Res. Board sept. /85		<table><tr><td></td><td>T_1</td><td>T_2</td><td>T_3</td></tr><tr><td>Zona 1</td><td>30,0</td><td>7,8</td><td>2,8</td></tr><tr><td>Zona 2</td><td>25,5</td><td>6,7</td><td>2,2</td></tr><tr><td>Zona 3</td><td>22,7</td><td>6,1</td><td>2,2</td></tr></table>		T_1	T_2	T_3	Zona 1	30,0	7,8	2,8	Zona 2	25,5	6,7	2,2	Zona 3	22,7	6,1	2,2
	T_1	T_2	T_3															
Zona 1	30,0	7,8	2,8															
Zona 2	25,5	6,7	2,2															
Zona 3	22,7	6,1	2,2															
NEW ZELAND	 parabola 6° grado	$T = 32\text{ }^{\circ}\text{C}$																
G.BRITAIN		<table><tr><td>h (m)</td><td>T_1</td><td>T_2</td><td>T_3</td></tr><tr><td>0,20</td><td>12</td><td>5</td><td>0,1</td></tr><tr><td>1,00</td><td>15,4</td><td>4</td><td>2</td></tr><tr><td>1,50</td><td>15,4</td><td>4,5</td><td>2</td></tr></table>	h (m)	T_1	T_2	T_3	0,20	12	5	0,1	1,00	15,4	4	2	1,50	15,4	4,5	2
h (m)	T_1	T_2	T_3															
0,20	12	5	0,1															
1,00	15,4	4	2															
1,50	15,4	4,5	2															
AUSTRALIA		<table><tr><td></td><td>T_1</td><td>T_2</td><td>T_3</td></tr><tr><td></td><td>24°</td><td>6°</td><td>0°</td></tr></table>		T_1	T_2	T_3		24°	6°	0°								
	T_1	T_2	T_3															
	24°	6°	0°															
GERMANY		$T = 7\text{ }^{\circ}\text{C}$																
FRANCE		$T = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$																
DENMARK		$T = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$																
SWEDEN		$T = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$																