

**EFFECTO COMBINADO DE LAS CARGAS DE TRAFICO Y DE LOS GRADIENTES TERMICOS EN EL DISEÑO DE PAVIMENTOS DE HORMIGON**

**Proposición de un método de dimensionamiento de pavimentos de hormigón para Chile.**

**Victor Faraggi Hernández**  
Investigador Depto. Ing. Civil - U. de Chile  
Castilla 223/8, Santiago.

**RESUMEN**

El propósito de este trabajo es estudiar el comportamiento de los pavimentos de hormigón bajo la acción simultánea del tráfico y de los gradientes térmicos en las losas de hormigón. Se presenta un nuevo procedimiento para el diseño estructural de los pavimentos en Chile.

Con el fin de prevenir el agrietamiento, tanto el espesor de las losas como su longitud, están determinadas por la limitación del daño producido por la repetición de las tensiones de tráfico combinadas con las tensiones fluctuantes, producto del combado de las losas. La evaluación del agrietamiento por rotura, se efectúa con una ley de fatiga, obtenida de un ajuste de la ley de Tepfer en base a datos del comportamiento de algunos pavimentos de hormigón en el país.

Las tensiones de tráfico, las tensiones térmicas de combado y las tensiones producto de la acción simultánea del tráfico y del gradiente en lasos de hormigón descansando sobre un sólido continuo estratificado, se calcularon utilizando un programa de elementos finitos.

Utilizando ecuaciones teórico-empíricas, basadas en la ley de Fourier, se obtuvo la predicción de los diferentes valores del gradiente térmico y su frecuencia de ocurrencia en el tiempo, en diferentes zonas del país.

Se obtuvieron los nuevos factores de equivalencia y las nuevas fórmulas de conversión de cargas por eje, así como las equivalencias de un vehículo pesado tipo medio en ejes equivalentes de 80 KN.

## 1. INTRODUCCION

Es normal, en los cálculos estructurales, considerar dos tipos de tensiones: aquellas producidas por las cargas aplicadas (ya sean permanentes o variables) y aquellas producidas por los efectos térmicos. Normalmente ambas se calculan separadamente y los resultados respectivos se suman. Esta hipótesis es correcta, por ejemplo, en el caso de una estructura de edificación, en la cual sus condiciones de apoyo son las mismas en ambos casos. Sin embargo, en los pavimentos de hormigón esto no es cierto, ya que, como es bien sabido, las losas se combarán como una consecuencia del gradiente térmico y una parte de cada una de ellas se despegará de la capa subyacente. Cuando las losas están combadas, las deformaciones producidas por las cargas de tráfico pueden restablecer el contacto, al menos parcialmente, con esta última capa. Desde un punto de vista matemático, las condiciones de borde del problema de calcular tensiones y deformaciones en una losa en particular sometida a una carga de tráfico y sometida simultáneamente a la acción de un gradiente térmico, no son las mismas de considerar ambos casos por separado: En algunos casos (Ref. 1) esto se ha comprobado por mediciones de pavimentos existentes en los que los valores de las tensiones calculadas individualmente y posteriormente sumadas resultan claramente subvaluadas.

Este problema reviste especial importancia en un país como el nuestro, en que las variaciones climáticas son muy importantes en muchas de las regiones y, adicionalmente, donde las cargas por eje están entre las más altas del mundo.

Consecuentemente, esta investigación debe entenderse como el cálculo de los efectos combinados de las cargas de tráfico y de los gradientes térmicos en los pavimentos de hormigón.

El trabajo ha sido dividido en dos partes :

- Una fase teórica, donde se estudian y presentan los siguientes tópicos:
  - el establecimiento de un método para determinar la frecuencia y el rango de los gradientes térmicos en las losas de hormigón, a partir de parámetros climáticos tales como la temperatura y la insolación.
  - el cálculo de las tensiones máximas producidas en un pavimento por la aplicación simultánea de las cargas de tráfico y el gradiente térmico. Ya que este proceso está lejos de poder ser resuelto de un modo analítico, se empleó una programa de computación (RISC) basado en el método de elementos finitos, que permitió el cálculo de estas tensiones en una serie de casos particulares. En seguida, se efectuaron varias correlaciones que ligan las tensiones calculadas con los diferentes parámetros considerados (gradientes térmicos, longitudes y espesores de losa, ...).
  - la selección de una ley de fatiga en relación con la observación del comportamiento de los pavimentos en Chile.

Una fase práctica, basada en los resultados obtenidos en la fase teórica, donde están resueltos algunos problemas, tomando en consideración las características climáticas particulares y las distribuciones de carga involucradas en las carreteras chilenas y que incluye los siguientes puntos :

- la definición de una división climática del país, tomando en cuenta la ocurrencia del gradiente térmico.
- la definición de una distribución promedio por eje y hora, obtenidas de mediciones efectuadas por la Dirección Nacional de Vialidad.
- la determinación de las relaciones de equivalencia entre las diferentes cargas por eje, considerando factores tales como el clima y las longitudes de las losas.

## 2.1 Método para el Cálculo de los Gradientes Térmicos.

Suponiendo que la cantidad de calor absorbido por un cuerpo es igual a la cantidad entregada por él, esta transmisión de calor está regulada por la ley de Fourier que se expresa de la siguiente forma :

$$\frac{dt}{dt} = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \left[ \frac{a^2 T}{a_x^2} + \frac{a^2 T}{a_y^2} + \frac{a^2 T}{a_z^2} \right] \quad (1)$$

donde  $T$  = temperatura del cuerpo, en °C;  $t$  = tiempo, en horas;  $c$  = calor específico del cuerpo, en J/kg °K;  $\rho$  = densidad en kg/cm³;  $\lambda$  = conductividad térmica del cuerpo, en W/m °K;  $x, y$  = coordenadas del plano horizontal, en m;  $z$  = coordenada perpendicular al plano ( $x, y$ ), en m.

Si el flujo térmico incidente en el plano horizontal es insignificante, la ecuación puede formularse como :

$$\frac{dT}{dt} = a \frac{d^2 T}{dz^2} \quad (2)$$

Si asumimos una variación sinusoidal de la temperatura a lo largo del tiempo, la solución de la ecuación 2, puede escribirse como sigue :

$$T_{zt} = t_M + t_0 \cdot e^{-z \sqrt{\pi/a \cdot T}} \cdot \sin \left( \frac{2\pi t}{T} - z \sqrt{\pi/a \cdot T} \right) \quad (3)$$

donde  $T_{zt}$  = temperatura a la profundidad  $z$  en el instante  $t$ ;  $t_M$  = temperatura media del fondo y/o superficie en un intervalo de 24 horas, en °C;  $t_0$  = rango de la variación de la temperatura en la superficie del pavimento durante las 24 hrs., en °C;  $T$  = periodo de variación ci-

clica de la temperatura (86.400 segundos ciclo diario);  $a$  = coeficiente de difusividad, en  $m^2/seg$ .

Como se muestra en la Figura 1, la intensidad de la radiación solar en el caso de un día despejado, crece continuamente desde la aurora hasta el zenith y ahí decrece, también de forma constante, hasta el ocaso. La caída de la temperatura no termina en el ocaso, ya que la energía térmica almacenada en el pavimento es liberada incesantemente a través de su superficie durante la noche. Consecuentemente, las variaciones de temperatura en la superficie del pavimento en el periodo de 24 horas considerado, no pueden ser representadas por una función sinusoidal simple.

El intervalo en el que la temperatura aumenta, corresponde más o menos a la mitad del periodo de insolación y por otra parte, el ciclo de decrecimiento también incluye las horas nocturnas. Así, aparece una evidente esimetría en el desarrollo de las temperaturas superficiales del pavimento a lo largo del día. Para describir este comportamiento de forma analítica, se utilizaron dos expresiones; una de ellas aplicable al intervalo de tiempo entre la aurora y el zenith y la otra, desde el zenith hasta la aurora siguiente.

Consecuentemente, durante el intervalo comprendido entre la aurora ( $t = 0$ ) y el zenith ( $t = S_h$ ) y de acuerdo a la ecuación 3, puede utilizarse la siguiente expresión para calcular la temperatura superficial del pavimento:

$$T_{ot} = T_M + t_0 \cdot \sin \left[ \frac{\pi(2t - S_h)}{2 S_h} \right] \quad (4)$$

donde  $T_{ot}$  = temperatura de la superficie del pavimento en el instante  $t$ ;  $T_M$  = temperatura media de la superficie en el periodo de 24 horas;  $t_0$  = rango de variación de la temperatura superficial del pavimento, en un periodo de 24 horas.en °C.

Durante el lapso comprendido entre un zenith y la aurora siguiente ( $t = 24$  horas), la temperatura superficial puede calcularse mediante la siguiente expresión:

$$T_{ot} = T_M + t_0 \cdot \sin \frac{\pi(4(t + S_n) - S_a)}{2 S_a} \quad (5)$$

donde  $S_n$  = intervalo entre el ocaso y la aurora, en horas  
 $S_a = 2 \cdot S_h + 2 \cdot S_n$

A estos parámetros se le asignaron los siguientes valores

- Periodo Estival :       $S_h = 10$  horas
- $S_n = 7$  horas
- $S_a = 34$  horas

Período Invernal :  $S_h = 8$  horas  
 $S_n = 10$  horas  
 $S_a = 36$  horas

Por otra parte, a una cierta profundidad  $z$ , los valores extremos de las temperaturas se producen más tarde que aquellos de la superficie. Para calcular la variación de la temperatura a la profundidad  $z$ , se utilizaron las siguientes expresiones, similares a las 4 y 5, pero introduciendo un factor de amortiguamiento que representa la inercia térmica del material del pavimento.

$$T_{zt} = T_M + t_0 \cdot e^{-z \sqrt{\pi/a \cdot S_{zh}}} \cdot \sin \left[ \frac{\pi(2t - S_h) - z \sqrt{\pi/a \cdot S_{zh}}}{2S_n} \right] \quad (6)$$

$$T_{zt} = t_M + t_0 \cdot e^{-z \sqrt{\pi/a \cdot S_{za}}} \cdot \sin \left[ \frac{\pi(4(t + S_n) - S_a) - z \sqrt{\pi/a \cdot S_{za}}}{2 \cdot S_a} \right] \quad (7)$$

donde :

$$S_{zh} = \frac{z^2 \cdot S_h^2}{a \cdot \pi \cdot u_z^2} \quad (8)$$

$$S_{za} = \frac{z^2 \cdot S_a^2}{a \cdot \pi \cdot u_z^2} \quad (9)$$

$$y \quad u_z = \frac{z}{2} \sqrt{\frac{T}{a \cdot \pi}}$$

Se asumió que  $a = 0.31 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{seg}$

También en las expresiones 7 y 8:

$$t_M = t_A + t_I$$

$t_A$  = temperatura del aire, en  $^{\circ}\text{C}$

$t_I$  = aumento de temperatura por insolación, en  $^{\circ}\text{C}$

$$t_0 = \Delta t_0 + t_I$$

$\Delta t_0$  = variación de la temperatura del aire

$$t_I = \frac{0.6 \cdot \alpha \cdot I_0}{h} - 3.9 \quad (10)$$

En la fórmula 10:

$\alpha$  = coeficiente de absorción normal, asumido igual a 0.65 para transferencia de calor

- $h$  = coeficiente de transmisión pelicular, asumido igual a  $20 \text{ W}/\text{m}^2 \text{ K}$   
 para el hormigón  
 $I_0$  = constante solar, igual a  $1300 \text{ W}/\text{m}^2$

En la Figura 2 y de una forma esquemática, se representan los intervalos de validez de las expresiones 4, 5, 6 y 7.

Para realizar los cálculos de acuerdo a estas fórmulas se realizó un programa de computación (TEMP1). Con el fin de armonizar estos resultados con las mediciones de terreno, se introdujeron tres coeficientes  $\alpha$ ,  $\beta$ , y  $\gamma$ ; siendo  $\alpha$  una coeficiente de ajuste,  $\beta$  un coeficiente de corrección por ventilación y  $\gamma$  un coeficiente de corrección por lluvias.

El coeficiente  $\beta$  está definido por la siguiente expresión:

$$\beta = \sqrt{(H + C)^2 + C^2} \quad (11)$$

donde:

$$\begin{aligned}
 H &= \alpha_k / \lambda, \text{ en } \text{m}^{-1} \\
 C &= \sqrt{\pi / \lambda t}, \text{ en } \text{m}^{-1} \\
 \alpha_k &= 7.38 + 4.91 \cdot W^{0.75}, \text{ en } (\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}) \\
 W &= \text{velocidad del viento, en m/seg.}
 \end{aligned}$$

El coeficiente  $\gamma$  representa el complemento de días lluviosos anuales, en por mil.

Estos coeficientes se introducen en los cálculos de  $T_M$  y de  $t_0$  de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}
 t_M &= (t_a + t_j) \cdot \beta \cdot \gamma \\
 t_0 &= (\Delta t_0 + t_j) \cdot \beta \cdot \gamma \cdot (1 - \alpha)
 \end{aligned} \quad (12)$$

La Figura 3 muestra el diagrama de flujo del programa TEMP1.

## 2.2 Cálculo de las tensiones debidas al efecto combinado de las cargas de tráfico y los gradientes térmicos.

Para cuantificar el efecto de la aplicación simultánea de las cargas de tráfico y los gradientes térmicos, se consideraron y combinaron diferentes e importantes parámetros indicados en la Tabla 1.

Como puede apreciarse en la Figura 4, la posición de carga C representa un eje simple, carga por eje ubicada en el punto medio entre dos juntas transversales. La separación entre centro de ruedas es de 182.9 cm, y la distancia entre la junta longitudinal y el centro de la rueda exterior es igual a 45.7 cm. Por otra parte, la posición de carga J representa la misma carga ubicada tangencialmente a la junta-transversal.

Si comparamos estos casos de carga con los casos clásicos estudiados por Westergaard, el caso C puede asimilarse a una combinación de

carga central y una carga de borde; el caso J, a una combinación de una carga de borde y una de esquina.

De entre los diferentes casos incluidos en la Tabla 1, aquellas combinaciones de cargas de tráfico con gradientes nulos, fueron utilizadas para comparar los resultados obtenidos mediante el método de elementos finitos con aquellos obtenidos por otros procedimientos, por ej., con las Cartas de Influencia de Rickett y Ray. Las soluciones presentan una buena correspondencia.

Más aún, las combinaciones de gradientes y cargas de tráfico nulas se utilizaron para comparar sus resultados con aquellos obtenidos con la teoría de Westergaard-Bradburg-Kelley. Se encontró que las soluciones obtenidas con la teoría clásica, generalmente estaban subestimadas.

Cabe señalar, que con estas combinaciones particulares (carga de tráfico y gradiente cero, gradiente con carga de tráfico nula), fue posible realizar una comparación entre las tensiones resultantes de la suma de los valores obtenidos separadamente en ambos casos (como se asume en algunos procedimientos de diseño) y aquellas calculadas considerando la presencia simultánea de la carga de tráfico y el gradiente térmico.

En todos los casos, se consideraron losas descansando sobre un sólido elástico estratificado compuesto de las siguientes capas (Fig. 5):

- una base tratada con cemento, de 15 cm. de espesor;
- una sub-base de suelo cemento, de 15 cm. de espesor;
- una subrasante de espesor infinito con un índice CBR igual a 5.

La Tabla 2 incluye los valores máximos de las tensiones obtenidas en los diferentes casos estudiados. Hay que ser enfático en recalcar que sólo se consideró para los cálculos una losa aislada, por lo que no se tomó en cuenta la transferencia de carga por las juntas. En todo caso, esta situación hace que se esté por el lado de la seguridad.

Debido a que el programa utilizado requiere un tiempo considerable de computador, se realizó un análisis de regresión con los resultados obtenidos de las diferentes combinaciones estudiadas. El propósito de ello fue el obtener fórmulas que entreguen los valores máximos de las tensiones de forma sencilla, en función de los siguientes parámetros:

- eje de carga  $P$ , en toneladas
- gradiente térmico  $\theta$ , en  $^{\circ}\text{C}/\text{cm}$
- espesor  $h$  y longitud  $L$  de las losas, ambos en cm.

Las tensiones calculadas mediante estas fórmulas están expresadas en MPa. Se estudiaron varios tipos de correlaciones tanto para carga de posición central como para carga de junta. La formulación exponencial entregó los mejores resultados, los que se incluyen a continuación con los coeficientes de correlación respectivos.

TABLA N° 1

Valores de los parámetros de diseño considerados en el estudio

Longitud losa L (cm)	Espesor losa h (cm)	Eje de carga P (kN)	Posición de la carga	Gradiente térmico (°C/cm)
350	23	0	C	0
450	25	80	J	0.3
550	28	130		0.6
		160		0.8
				-0.4

TABLA N° 2

Valores máximos de las tensiones (MPa) en losas de hormigón sometidas a cargas de tráfico y/o Gradientes Térmicos

Gradiente térmico	Carga	0°C/cm			-0.4°C/cm			<0.3°C/cm			+0.3°C/cm			+0.8°C/cm		
		8	13	16	0	8	13	16	0	8	13	16	0	8	13	16
350	C	0.59	0.91	1.18	0.44	1.94	2.33	2.29	1.30	2.29	2.49	2.67	1.30	3.08	3.76	4.35
	J	1.17	1.69	1.81	2.51				3.00				4.81			4.39
	J	0.56	0.85	1.06	0.77	1.74	2.07	2.11	1.20	2.08	2.68	2.94	1.20	3.03	3.52	4.29
450	C	1.01	1.57	1.72	0.77	2.03	2.64	2.66	2.62	2.93			3.29	4.56	5.02	5.75
	J	0.49	0.80	1.03	0.70	1.70	1.91	2.05	1.10	1.96	2.48	2.83	1.30	3.00	3.46	3.78
	J	0.88	1.37	1.65		2.53			2.03				3.61			4.33
550	C	0.59	1.05	1.33	1.55	1.96	2.49	2.52	1.28	2.43	2.74	3.04	1.89	3.38	4.10	4.67
	J	1.13	1.69	2.04		2.49			2.95				4.81			5.29
	J	0.52	0.83	1.16	1.73	2.06	2.42	2.46	1.37	2.18	2.79	3.03	1.70	3.44	3.91	4.37
23	C	1.00	1.57	1.97	2.46	2.57	2.70	2.70	1.37	2.51	2.75	3.37	1.70	3.17	4.41	5.01
	J	0.76	1.34	1.73	2.06	2.31	2.53	2.53	1.45	2.20	2.70	3.06	1.54	3.38	3.93	4.23
	J	0.85	1.40	1.51		2.76			1.98				3.73			4.66
25	C	0.65	1.05	1.31	2.10	2.40	2.62	2.46	1.31	2.38	2.76	2.47	2.48	3.56	4.30	4.87
	J	1.10	1.68	2.05		2.51			2.90				4.64			5.05
	J	0.56	0.92	1.16	2.20	2.20	2.29	2.46	1.42	2.39	2.99	2.60	2.35	3.48	4.09	4.52
28	C	0.99	1.57	1.97	2.60	2.37	2.63	2.63	1.42	2.63	2.83	3.73	2.35	2.65	4.41	5.05
	J	0.50	0.92	1.03	2.02	2.10	2.16	2.40	1.52	2.27	2.77	3.19	2.13	3.60	4.03	4.36
	J	0.89	1.37	1.63		2.60			1.97				3.86			4.87

C = Posición de carga central

J = Posición de carga de junta

1. Cargas de tráfico sin gradientes

- posición de carga central

$$\sigma_c = e^{0.356} \frac{p^{1.046} L^{0.128}}{h^{1.219}} \quad (13)$$

(Coeficiente de correlación  $R = 0.985$ )

- posición de carga en junta

$$\sigma_j = 2^{2.042} \frac{p^{0.802} L^{0.0403}}{h^{1.215}} \quad (14)$$

(Coeficiente de Correlación  $R = 0.890$ )

2. Cargas de tráfico y gradientes térmicos

- posición de carga central

$$\sigma_c = e^{-0.193} \frac{p^{0.36} L^{0.25} e^{0.589}}{h^{0.18}} \quad (15)$$

$(R = 0.956)$

- posición de carga en junta

$$\sigma_j = e^{3.503} \frac{p^{0.357} L^{-0.079} e^{0.507}}{h^{0.701}} \quad (16)$$

$(R = 0.886)$

3. Gradientes térmicos sin cargas de tráfico

- posición de carga central

$$\sigma_c = e^{-6.113} \frac{L^{1.125} e^{0.319}}{h^{0.028}} \quad (17)$$

$(R = 0.886)$

Como puede apreciarse, las fórmulas propuestas presentan un muy buen coeficiente de correlación para el caso de carga en posición central.

En la Figura 6 se presentan algunas curvas correspondientes a las diferentes correlaciones estudiadas.

Como era de esperar, los puntos de las losas de máxima tensión, varían para cada caso en particular. Estos puntos están indicados en la Figura 9 que muestra, adicionalmente, la malla de elementos finitos empleada. En las Tablas 3, 4 y 5 se presentan los valores de las

TABLA N° 3  
Valores máximos de las tensiones (MPa) en los puntos críticos (Posición de carga central)

Puntos (coordenados x, y)	$\theta = 0^{\circ}\text{C/cm}$ $P = 13 \text{ t}$			$\theta = -0.4^{\circ}\text{C/cm}$ $P = 13 \text{ t}$			$\theta = +0.3^{\circ}\text{C/cm}$ $P = 13 \text{ t}$			$\theta = +0.6^{\circ}\text{C/cm}$ $P = 13 \text{ t}$		
	$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\sigma_{max}$	$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\sigma_{max}$	$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\sigma_{max}$	$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\sigma_{max}$
A (1/2, 3b/8)	-0.76	0.07	-0.76	1.04	2.41	2.41	-1.36	-2.05	-2.05	-2.97	-1.67	-2.98
B (1/2, b/8)	-0.03	-0.10	-0.03	0.10	0.76	0.82	-1.74	-2.77	-2.77	-3.95	-1.92	-3.95

Nota: Los valores negativos corresponden a la tracción en las fibras del fondo.

$b$  = ancho de la losa.  
 $b = 3.66 \text{ m}$

TABLA N° 4  
Valores máximos de las tensiones (MPa) en los puntos críticos (Posición en junta)

Puntos (coordenados x, y)	$\theta = 0^{\circ}\text{C/cm}$ $P = 13 \text{ t}$			$\theta = -0.4^{\circ}\text{C/cm}$ $P = 13 \text{ t}$			$\theta = +0.3^{\circ}\text{C/cm}$ $P = 13 \text{ t}$			$\theta = +0.6^{\circ}\text{C/cm}$ $P = 13 \text{ t}$		
	$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\sigma_{max}$	$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\sigma_{max}$	$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\sigma_{max}$	$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\sigma_{max}$
C (1, 6/8)	-0.13	-1.66	-1.57	0.95	-0.95	-1.04	-2.26	-2.36	-2.36	-0.43	-3.43	-3.52
C1 (1, 5b/8)	-0.12	-1.68	-1.52	-0.12	-0.96	-1.02	-2.23	-2.76	-2.76	-0.30	-4.39	-4.39
E (0.71, b/2)	0.52	0.09	0.52	2.61	2.20	2.61	-0.75	-1.03	-1.03	-1.13	-1.30	-1.35

Nota: Los valores negativos corresponden a la tracción en las fibras del fondo.

$b$  = Longitud de la losa  
 $b = 4.57 \text{ m}$

TABLA N° 5  
Valores máximos de las tensiones (MPa) en los puntos críticos  
en losa sometida sólo a Gradientes Térmicos

Puntos (coordenados x, y)	$\theta = -0.4^{\circ}\text{C/cm}$ $P = 0 \text{ t}$			$\theta = 0.3^{\circ}\text{C/cm}$ $P = 0 \text{ t}$			$\theta = +0.6^{\circ}\text{C/cm}$ $P = 0 \text{ t}$		
	$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\sigma_{max}$	$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\sigma_{max}$	$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\sigma_{max}$
A (1/2, 3b/8)	1.33	0.80	1.33	-1.13	-0.71	-1.13	-1.40	-0.53	-1.40
B (1/2, b/8)	0.04	0.03	0.04	-1.26	-0.26	-1.26	-1.59	-0.25	-1.59
C (1, b/8)	0.02	0.12	0.12	-0.11	-0.67	-0.78	-0.13	-0.75	-0.91
C1 (1, 5b/8)	0.005	0.32	0.32	-0.87	-1.16	-1.16	-0.88	-1.26	-1.27
E (0.71, b/2)	0.65	0.87	0.86	-0.94	-0.85	-0.94	-1.17	-0.85	-1.18
A1 (1/2, b/2)	1.72	1.37	1.72	-1.11	-0.76	-1.11	-1.38	-0.76	-1.38
B1 (1/2, 0)	0.75	-0.002	0.75	-1.37	-0.62	-1.37	-1.70	-0.06	-1.70

Nota: Los valores negativos corresponden a la tracción en las fibras del fondo.

$b$  = Longitud de la losa  
 $b = 4.57 \text{ m}$

tensiones  $\sigma_x$  y  $\sigma_y$  (paralelas a los bordes) en estos puntos particulares, así como los valores de tensión máxima. Generalmente, esta es paralela o casi paralela a un borde o a una junta.

La Tabla 6 muestra una comparación entre las tensiones obtenidas considerando el efecto simultáneo de una carga de tráfico y un gradiente térmico y los valores resultantes de la suma de las tensiones calculadas por separado. En nuestra opinión, los resultados indicados en esta tabla es una de las más interesantes conclusiones del presente trabajo.

Como puede apreciarse, virtualmente en casi todos los casos considerados en la Tabla 6, las tensiones obtenidas considerando una carga de tráfico y un gradiente térmico aplicado al mismo tiempo, son claramente mayores que la suma de aquellas calculadas considerando cada factor por separado. Como una consecuencia, los resultados obtenidos de acuerdo a esta última hipótesis y utilizados en algunos procedimientos de diseño están subvaluados.

En la Tabla 7 se presentan los ratios entre las tensiones calculadas por estos dos procedimientos. Como puede verse, estos ratios son muy altos en la mayoría de los casos y tienen un gran efecto en los cálculos de diseño.

Un análisis de las tensiones muestra que, para un eje de carga de 130 kN, el maximo valor se obtiene cuando esta carga está ubicada cerca de una junta transversal, lo que está acorde con la teoría de Westergaard.

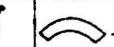
Sin embargo, las diferencias entre las tensiones resultantes de las posiciones central y de junta de un eje (importantes cuando no existe un gradiente) decrecen a medida que aumenta el gradiente, llegando a ser muy reducidas. Aún para gradientes de aproximadamente, + 0.3 °C/cm, las tensiones producidas por un eje de carga en la llamada posición central son levemente superiores a aquellas producidas por la misma carga ubicada cerca de una junta transversal.

### 2.3 Ajuste de una Ley de Fatiga

Dado que en el presente trabajo el único factor de deterioro considerado es la fatiga, un paso fundamental fue adaptar una o dos leyes de fatiga para el hormigón. Como es sabido es un tópico que aún no ha sido resuelto satisfactoriamente. Una gran deficiencia al respecto, radica, en el hecho que cuando comparamos los resultados obtenidos de las leyes de fatiga propuestas por diferentes investigadores, estos resultan ser absolutamente discísimos. Despues de analizar diferentes posibilidades, se proponen dos leyes de fatiga, cada una correspondientes a las dos condiciones diferentes de apoyo, producidas por un gradiente positivo (y nulo) y por una gradiente negativo, cuyas ecuaciones son las siguientes:

TABLA N° 6

Comparación entre las tensiones obtenidas en los diferentes casos

Puntos (coordenadas $x, y$ )	$\theta = -0.6^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ $P = 130 \text{ (KN)}$	$\theta = -0.6^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ $P = 130 \text{ (KN)}$	$\theta = +0.6^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ $P = 130 \text{ (KN)}$	$\theta = +0.6^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ $P = 130 \text{ (KN)}$								
	POSICIÓN DE CARGA CENTRAL											
												
A (1/2, 3b/8)	$\sigma_x$ 1.04	$\sigma_y$ 2.41	$\sigma_{max}$ 2.42	$\sigma_x$ 0.57	$\sigma_y$ 0.67	$\sigma_{max}$ 0.67	$\sigma_x$ -2.97	$\sigma_y$ -1.67	$\sigma_{max}$ -2.90	$\sigma_x$ -2.17	$\sigma_y$ 0.45	$\sigma_{max}$ -2.17
	$\sigma_x$ 0.102	$\sigma_y$ 0.76	$\sigma_{max}$ 0.82	$\sigma_x$ 0.81	$\sigma_y$ -0.67	$\sigma_{max}$ -0.67	$\sigma_x$ -3.95	$\sigma_y$ -1.92	$\sigma_{max}$ -3.95	$\sigma_x$ -2.39	$\sigma_y$ -0.35	$\sigma_{max}$ -2.37
POSICIÓN DE CARGA EN JUNTA												
C (1, b/8) C1 (1, 5b/8) E (0.71, b/2)												
	$\sigma_x$ 0.05	$\sigma_y$ -0.95	$\sigma_{max}$ -1.04	$\sigma_x$ -0.11	$\sigma_y$ -1.64	$\sigma_{max}$ -1.64	$\sigma_x$ -0.43	$\sigma_y$ -3.43	$\sigma_{max}$ -3.52	$\sigma_x$ -0.26	$\sigma_y$ -2.31	$\sigma_{max}$ -2.31
	$\sigma_x$ -0.12	$\sigma_y$ -0.96	$\sigma_{max}$ -1.02	$\sigma_x$ -0.012	$\sigma_y$ -1.20	$\sigma_{max}$ -1.20	$\sigma_x$ -0.39	$\sigma_y$ -4.39	$\sigma_{max}$ -4.41	$\sigma_x$ -0.20	$\sigma_y$ -2.78	$\sigma_{max}$ -2.71
	$\sigma_x$ 2.61	$\sigma_y$ 2.14	$\sigma_{max}$ 2.61	$\sigma_x$ 1.17	$\sigma_y$ 0.97	$\sigma_{max}$ 1.17	$\sigma_x$ -1.13	$\sigma_y$ -1.30	$\sigma_{max}$ -1.35	$\sigma_x$ -0.66	$\sigma_y$ -0.76	$\sigma_{max}$ -0.76

Nota: Los valores negativos corresponden a la tracción en las fibras del fondo

a = Longitud de la losa  
(4.57 m)b = Ancho de la losa  
(3.66 m)

TABLA N° 7

Incremento de las tensiones producidas por la acción simultánea de las cargas de tráfico y los gradientes térmicos comparadas con aquellas obtenidas separadamente

Carga (KN)	Posición de la carga	Gradiente Térmico ( $^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ )	Incremento Tensional	
			Absoluto (MPa)	Porcentaje
130	C	-0.4	1.55	278
130	C	+0.6	0.81	137
130	J	-0.4	1.44	224
130	J	+0.6	1.62	158

C = Posición de carga central

J = Posición de carga en junta.

$$\log_{10} NF = 13 \left(1 - \frac{\sigma_{\max}}{MR}\right) (1 - R) \quad (\text{gradientes positivos y nulo}) \quad (18)$$

$$\log_{10} NF = 8.25 \left(1 - \frac{\sigma_{\max}}{MR}\right) (1 - R) \quad (\text{gradientes negativos}) \quad (19)$$

donde  $NF$  = número de ciclos de carga que producen la falla;  $MR$  = resistencia a la flexotracción del hormigón (third-point loading method) incrementada en un 10% para considerar la ganancia por edad;  $R = \sigma_{\min}/\sigma_{\max}$ , siendo  $\sigma_{\min}$  la tensión mínima y  $\sigma_{\max}$  la tensión máxima producida después de la aplicación de la carga. Por ejemplo, cuando el pavimento está sometido a la acción de un gradiente térmico,  $\sigma_{\min}$  es la tensión debida al gradiente y  $\sigma_{\max}$  la tensión producida por el efecto combinado del gradiente y la carga de tráfico.

Los coeficientes numéricos 13 y 8.25 de las fórmulas 18 y 19, difieren en mayor o menor grado de aquellos propuestos por otros investigadores, e.g. Tepfer o Domenichini. Fueron obtenidos por un proceso de ajuste, con el fin de definir leyes de fatiga acordes con el comportamiento *in situ* de varios tramos de pavimentos de hormigón en Chile, situados tanto en zonas de clima suave ( $T_{\max} - T_{\min} < 100^{\circ}\text{C}$ ) como en zonas de clima riguroso ( $T_{\max} - T_{\min} > 150^{\circ}\text{C}$ )

- tramos en la Ruta 5 Norte, situados en una zona de clima suave. Los pavimentos están compuestos por losas de 23 cm de espesor y longitudes variables. Estuvieron sometidas a un TMDA aproximado de 1800 vehículos, con un porcentaje aproximado de pesados de 37%. Las losas más largas, de 460 cm de longitud, comenzaron a agrietarse cinco años después de abiertas al tráfico. (Estación Los Vilos IV Región)
- tramos en la Ruta 5 Sur, situados en una zona de clima riguroso. Los pavimentos están compuestos por losas de 25 cm de espesor y longitudes variables. Estuvieron sometidas a un TMDA aproximado de 4000, con un porcentaje aproximado de pesados de 17,5%. Las losas más largas, de 455 cm de longitud, comenzaron a agrietarse cuatro años después de abiertas al tráfico. (Estación Quinta, VI Región)

### 3. FASE PRACTICA

Como una aplicación de los resultados obtenidos en la primera parte de este trabajo, se estudiarán algunos tópicos incluidos en el Volumen 3 del Manual de Carreteras de la Dirección Nacional de Vialidad del M.O.P. Considerando las diferentes zonas climáticas en Chile, y la composición del tráfico, se analizarán los siguientes temas:

- los factores de equivalencia entre ejes: la normativa nacional asume la ley de la cuarta potencia de los resultados del ensayo AASHO.
- el efecto destructor de un camión tipo medio, expresado en términos de ejes equivalentes de 80 KN.

Para estos fines, se efectuaron dos análisis previos:

- una división climática de Chile basada en la ocurrencia del gradiente térmico
- una evaluación de la agresividad del tráfico chileno en la red nacional, tomando en cuenta los rangos de pesos por eje obtenidos con la ayuda de básculas dinámicas.

### 3.1 División Climática de Chile basada en la ocurrencia del Gradiente Térmico

Para establecer esta división climática se analizaron los datos obtenidos de las mediciones efectuadas por el Plan de Seguimiento de Carreteras que lleva a cabo el IDIEM. Estos valores del gradiente térmico medidos in situ sirvieron para ajustar el modelo de transmisión de calor en las losas, llegando a la conclusión que son dos las distribuciones de frecuencia y ocurrencia del gradiente térmico que representa aceptablemente las diferentes zonas del país. Estas corresponden a zonas de clima marítimo (clima suave) con diferencias de temperatura entre la superficie y fondo de las losas superiores a 10°C y a clima continental (clima riguroso) con diferencias mayores de 15°C. Estas distribuciones se presentan en la Tabla 8.

### 3.2 Distribución de las Cargas de Tráfico

Para calcular el efecto del tráfico se utilizaron los resultados obtenidos por la Dirección Nacional de Vialidad del M.O.P. de los pesajes efectuados con básculas, en diferentes estaciones. Acorde con esto, se obtuvieron las siguientes distribuciones de cargas de tráfico:

- a) los resultados de la distribución de pesos por eje presentada en la Tabla 9
- b) la distribución horaria del tráfico, presentada en la Tabla 10.

### 3.3 Distribución Combinada de Cargas de Tráfico y Gradiente Térmico

Considerando por un lado la ocurrencia de los gradientes térmicos a lo largo de un año para los dos climas representativos y por otro, la distribución horaria del tráfico, se obtuvo la distribución combinada del gradiente térmico y de las cargas de tráfico presentada en la Tabla 11.

### 3.4 Factores de Equivalencia entre los diferentes pesos por eje considerando el Clima y las Longitudes de las Losas.

Como se vió anteriormente, el deterioro producido por las cargas por eje es muy diferente si están o no combinadas con el gradiente térmico. En ausencia de gradiente, las correlaciones deducidas muestran una aceptable linealidad entre las cargas aplicadas y las tensiones resultantes: el exponente de la cara P en las fórmulas 13 y 14 es

TABLA Nº 8  
Porcentaje de ocurrencia de gradiente térmico

Gradiente Térmico (°C/cm)	Clima Suave	Clima riguroso
+0.6	1.5	4.37
+0.4	3.14	5.27
+0.2	5.57	7.22
0.0	58.66	38.76
-0.5	26.38	31.52
-0.7	5.20	12.86

.Tabla Nº 9  
Distribución de pesos por eje del tráfico pesado

Ejes Pesados (KN)	Porcentaje
0-20	2.28
20-40	15.94
40-60	23.65
60-80	20.16
80-100	16.91
100-120	12.96
120-140	6.07
140-160	1.40
160-180	0.50
180-200	0.13
Total	100 %

TABLA N° 10  
Distribución horaria de tráfico pesado  
y gradiente térmico.

Hora del día	Porcentaje tráfico
0	7.06
1	5.79
2	4.00
3	4.07
4	2.42
5	2.20
6	2.51
7	3.29
8	4.17
9	2.67
10	3.82
11	4.35
12	4.61
13	2.35
14	2.55
15	4.66
16	5.79
17	3.97
18	5.73
19	5.59
20	2.14
21	4.90
22	5.79
23	5.56
Total	100 %

TABLA N° 11  
Distribución combinada del tráfico pesado  
y gradientes térmicos

Gradiente térmico °C/cm	Clima suave	Clima riguroso
+ 0.6	0.00	5.02
+ 0.4	3.83	4.68
+ 0.2	4.05	10.77
0.0	71.28	53.92
- 0.5	18.72	22.38
- 0.7	2.12	3.23
Total	100.00	100.00

cercano a 1. Por el contrario, cuando se considera la ocurrencia del gradiente térmico, esta linealidad desaparece: el exponente de la carga  $P$  toma valores de, aproximadamente, 0.36 en las fórmulas 15 y 16. Consecuentemente, es imposible establecer un simple factor de equivalencia entre dos diferentes pesos por eje como la adoptada en el Volumen 3 del Manual de Carreteras. Más aún, las correcciones en esos factores de equivalencia introducidas por el método AASHO de Diseño de Pavimentos, tomando sólo en cuenta el espesor de las losas, puede entregar resultados incorrectos.

Si aceptamos, una ley de potencia:

$$N_i \times P_i^\gamma = n_j \times P_j^\gamma$$

el exponente  $\gamma$ , puede presentar marcadas diferencias no sólo en función del espesor de las losas, sino también en función de la longitud de las mismas y de la zona climática donde el pavimento está situado. La Tabla 12 presenta los valores del exponente, tomando como eje de referencia un eje de 80 KN y considerando los parámetros mencionados anteriormente. Puede apreciarse que el rango del exponente  $\gamma$  va de 4 a 11, pudiendo tomar valores mucho mayores del valor 4 usualmente admitido. Estos valores constituyen otra prueba de la gran influencia que tienen los ejes sobrecargados en el comportamiento del pavimento, más notorio cuanto mayor sea la longitud de las losas.

Finalmente, la Tabla 13, muestra que la equivalencia de 1 vehículo pesado tipo medio en ejes de 80 KN es función tanto de las características geométricas de las losas como de la zona climática donde está ubicado el pavimento.

**TABLA N° 12**  
**Valores del exponente  $\gamma$  en la ecuación (7) <sup>17</sup>**  
**con carga centrada de borde P (KN) y**  
**eje de referencia de 80 (KN)**

L (cm)	H (cm)	Clima suave		Clima riguroso	
		MR= 5,09 MPa	MR= 5,39 MPa	MR= 5,09 MPa	MR= 5,39 MPa
350	21	3.98		4.66	
	23	3.13		4.61	
	25	3.76		4.62	
	28	3.04		4.72	
400	21	4.23		5.14	
	23	4.14		5.14	
	25	4.17		5.23	
	28	4.48		5.52	
450	21	4.54		5.73	
	23	4.52		6.05	
	25	4.66		5.97	
	28	5.42		6.59	
500	21	4.92		6.45	
	23	5.00		6.60	
	25	5.31		6.97	
	28	6.97		8.15	
550	21	5.37		7.36	
	23	5.82		7.62	
	25	6.17		8.04	
	28	10.09		11.26	

L = Longitud de la losa  
H = Espesor de la losa  
MR = Resistencia de la flexotensión del hormigón  
a los 28 días.

**TABLA N° 13**  
**Equivalencias en ejes de 80 KN de un vehículo pesado tipo medio**

L (cm)	H (cm)	Clima suave		Clima riguroso	
		Clima suave	Clima riguroso	Clima suave	Clima riguroso
350	21	9.28		10.71	
	23	8.74		10.48	
	25	8.69		10.43	
	28	8.78		11.01	
400	21	10.31		13.36	
	23	9.92		13.36	
	25	10.05		13.57	
	28	11.47		16.10	
450	21	11.77		17.89	
	23	11.65		21.11	
	25	12.43		20.24	
	28	17.76		28.19	
500	21	12.05		26.12	
	23	14.52		23.34	
	25	16.14		32.23	
	28	40.41		71.24	
550	21	14.54		43.59	
	23	19.63		50.79	
	25	26.56		65.39	
	28	295.18		556.58	

## REFERENCIAS.

1. Barber, E.S. (1968). Calculation of Maximum Pavement Temperature from Weather Reports, Highway Research Record 256.
2. Ceza, P., Patricio. (1986). Estudio de la Distribución de Temperaturas en las Estructuras de Pavimento. Memoria de Título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile, Santiago.
3. Dempsey, B.J. and Thompson, M.R. (1970). A Heat-Transfer Model for Evaluation Frost Action and Temperature - Related Effects in Multilayered Pavement Systems. Highway Research Record 342.
4. Domenichini, L., Marchiona, A. (1981). Influence of Stress Range on Plain Concrete Pavement Fatigue Design. Proceeding end. International Conference on Concrete Pavement Design. Purdue.
5. Eisenmann, J. (1970). Bernessung von Zement Betondecken. Kueschbaum Verlag. Bonn, Bad Godesberg.
6. Faraggi, V. (1986). Estudio de la Influencia de las Solicitaciones Estacionales de Tráfico y de Temperatura en el Dimensionamiento de los Firmes Rígidos. Tesis Doctoral. E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid.
7. Francke, H. (1968). Ueber die Temperaturverteilung in duennen Betonkonstruktionen, insbesondere in Zweischichtigen Betonwaeden, infolge der extremalwerte der Lufttemperatur und der Sonnenstrahlung. Fortschrittsbericht der VDI-Zeitschrift. Reihe 4, Nº 2.
8. Groeber, H. Erk, S. and Grigull, V. (1977). Transmisión del Calor. Editorial Selecciones Científicas. Madrid.
9. Majidzadeh, K., Ilves, G.J. and Skyluth, H. (1983). Mechanistic Design of Rigid Pavements. Vol. I, II : Design and Implementation Manual, Final Report. FHWA, Washington.
10. Ministerio de Obras Públicas, Dirección Nacional de Vialidad. (1987). Manual de Carreteras, Vol. 3, Diseño de Pavimentos. (en revisión).

### Listado de Símbolos

T	= temperatura
t	= tiempo
c	= calor específico
$\rho$	= densidad
$\lambda$	= conductividad térmica
x,y,z	= coordinadas ortogonales
$T_M$	= temperatura media de la superficie durante un período 24 horas
$t_0$	= variación de la temperatura en la superficie del pavimento durante un período de 24 horas
$S_h$	= intervalo entre alba y alba
$S_n$	= intervalo entre crepúsculo y alba
$t_a$	= temperatura del aire
$T_I$	= incremento de la temperatura debido a la insolación
$\Delta t_0$	= variación de la temperatura del aire
$\alpha$	= coeficiente de absorción normal
$h$	= coeficiente de transmisión pelicular
$I_0$	= constante solar
$\sigma_c$	= tensión por carga centrada de borde
$\sigma_j$	= tensión por carga de junta
P	= carga por eje
L	= longitud de la losa
H	= espesor de la losa
$\theta$	= gradiente térmico
M.R.	= módulo de rotura (resistencia a la flexotracción del hormigón)
NF	= número de ciclos de carga
$\sigma_{max}$	= tensión máxima aplicada
$\sigma_{min}$	= tensión mínima aplicada
R	= $\sigma_{min}/\sigma_{max}$

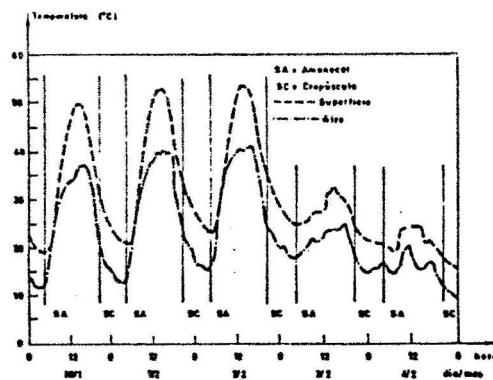


FIG. 1 DESARROLLO DE LA TEMPERATURA DEL AIRE Y DE LA SUPERFICIE DEL PAVIMENTO PARA 5 DIAS CONSECUTIVOS DE VERANO.

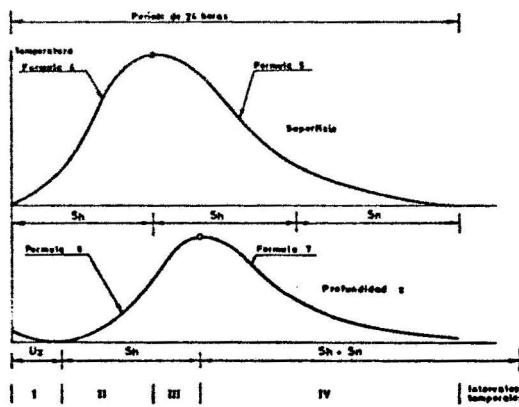


FIG. 2 DOMINIO DE VALIDEZ DE LAS FÓRMULAS 4, 5, 6 y 7.

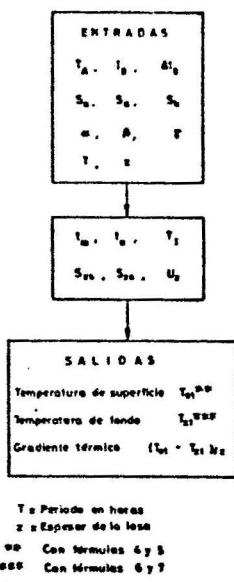


FIG.3 DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROGRAMA TEMPI

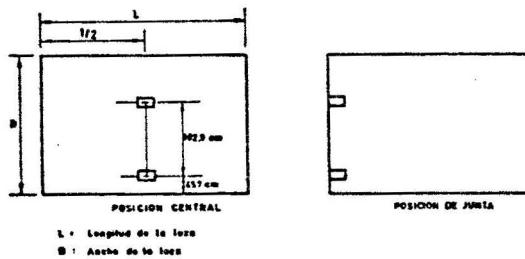


FIG.4 DIFERENTES POSICIONES DE CARGA CONSIDERADAS EN EL ESTUDIO

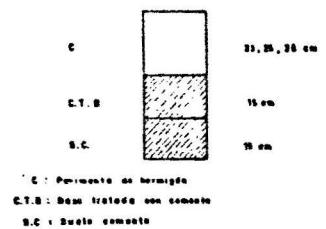


FIG.5 SECCIONES ESTRUCTURALES CONSIDERADAS EN EL ESTUDIO

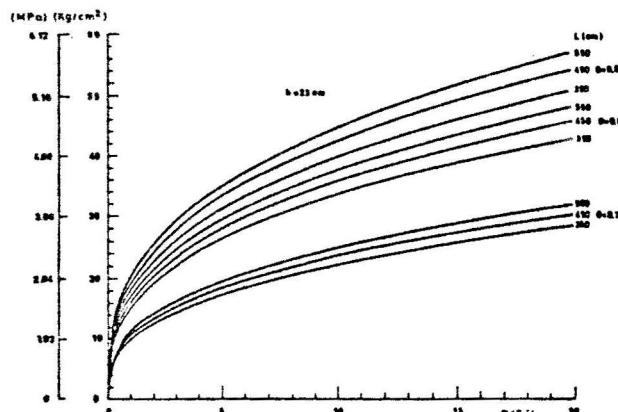


FIG.6 TENSIONES MAXIMAS PRODUCIDAS POR LA ACCION SIMULTANEA DE UNA CARGA DE TRAFICO P (Posición central) Y UN GRADIENTE TERMICO. ESPESOR DE LA LO-  
 SA : 23 cm.

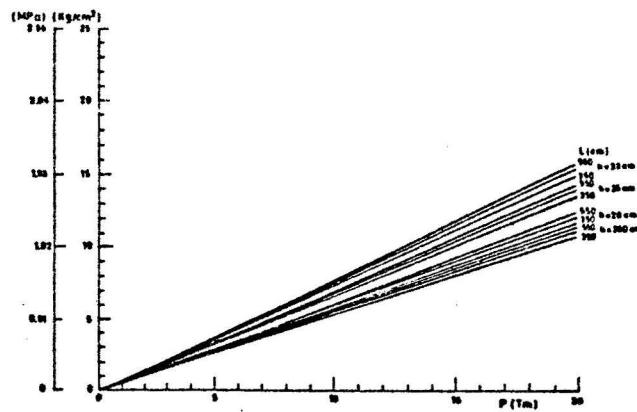


FIG. 7 TENSIONES MAXIMAS PRODUCIDAS POR UNA CARGA DE TRAFICO  $P$

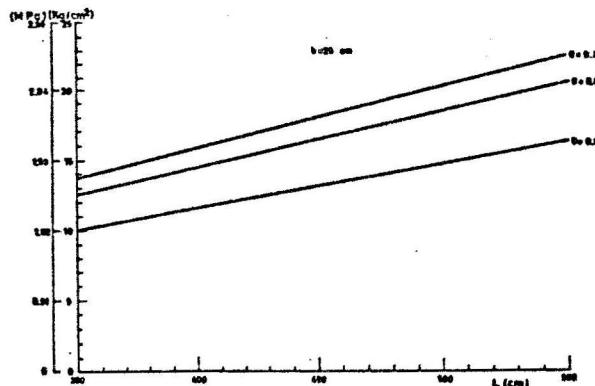


FIG. 8 TENSIONES MAXIMAS PRODUCIDAS POR UN GRADIENTE TERMICO.  
ESPESOR DE LA LOSA: 25 cm.

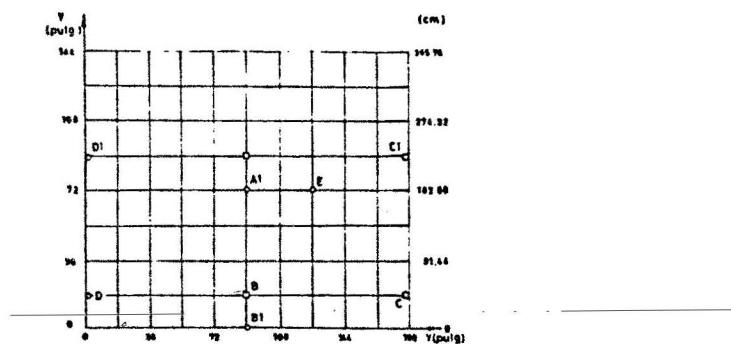


FIG. 9 MALLA DE ELEMENTOS FINITOS Y PUNTOS CRITICOS  
PARA LAS POSICIONES DE CARGA CONSIDERADAS