

## Comportamiento de pavimentos de hormigón en Chile

**Juan Pablo Covarrubias T.**

Profesor del Departamento de Ingeniería de Construcción, Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile, Casilla 6177, Santiago, Chile.

**RESUMEN:** en Chile los pavimentos de hormigón se construyen sin barras de traspaso de carga en las juntas transversales. Debido a las condiciones de clima se produce una deformación cóncava hacia arriba, la que, bajo la acción del tráfico, induce una falla prematura del pavimento. Se implementaron ensayos de terreno y laboratorio, en Chile, para estudiar el problema. Se encontró que las deformaciones son mayores que las esperadas. Se desarrolló un modelo de elementos finitos para estudiar las tensiones en las losas bajo estas condiciones. Las implicancias, en el diseño de pavimentos de hormigón, de estas condiciones climáticas, son: (a) las tensiones en la losa son mayores que las que consideran los procedimientos de diseño clásicos; (b) es importante la relación entre el largo de la losa y la distancia entre ejes de los vehículos de carga, en el nivel de tensiones generadas en las losas; (c) el traspaso de carga en las juntas transversales a través de la trabazón del agregado del hormigón no funciona; (d) el movimiento relativo vertical entre losas adyacentes es grande y hace fallar por fatiga al material de sello de juntas; y (e) es difícil sellar la unión entre el pavimento de hormigón y la berma. Se concluye que es necesario continuar con el desarrollo de investigación, tanto en laboratorio como en terreno, con el objeto de resolver este problema que presentan los pavimentos de hormigón en Chile y en el extranjero.

### I. INTRODUCCION

Los pavimentos de hormigón son comunes en Chile para carreteras principales y calles de ciudad. Estos pavimentos presentan deformaciones excesivas por alabeo, grietas en las losas y falla prematura de los sellos de juntas (1,2, 3). Estos problemas son originados, aparentemente, por los grandes cambios de temperatura entre el día y la noche y la baja humedad relativa que tenemos en nuestro país.

Con el fin de estudiar el comportamiento de las losas de hormigón de pavimentos, se desarrolló un modelo de elementos finitos, el cual se implementó a través de un programa computacional (3, 4, 5). Este programa determina las tensiones y deformaciones del pavimento producidas por el clima y/o cargas de tráfico. Este modelo se calibró con mediciones en terreno y propiedades de los materiales determinadas en laboratorio (1,4).

### II. MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

El modelo de elementos finitos desarrollado está basado en la teoría clásica de losas delgadas. Usa elementos rectangulares con doce grados de libertad (6, 7, 8, 9).

En pavimentos de hormigón es importante modelar los diferentes estados de carga y considerarlos en conjunto con la deformación de la losa por efecto del clima. En este último caso, el modelo debe simular la posibilidad de que la losa, al deformarse, pierda contacto con la sub-base.

En el modelo de elementos finitos desarrollado, la sollicitación es representada por un conjunto de cargas en los nodos y asociadas a los grados de libertad definidos para cada nodo (4). En este caso, la aproximación numérica a los valores reales se ha obtenido utilizando un número relativamente alto de elementos finitos.

El suelo se simuló utilizando el modelo Winkler; este usa el coeficiente de balasto ( $k$ ) para caracterizarlo. En este modelo la sub-base es representada por un conjunto de resortes actuando en los nodos. A pesar de que este modelo es muy simplista, en general representa en buena forma los valores experimentales observados, tiene la ventaja de proporcionar una interpretación física sencilla y permitir un algoritmo iterativo de convergencia cuando existen tensiones de tracción en los resortes al separarse la losa de la sub-base. El análisis, con el modelo de elementos finitos, comienza con la suposición de que la sub-base contribuye a la rigidez del sistema en toda la superficie de la losa por medio de resortes activos en los nodos. Cuando un resorte entra en tracción (separación de la losa de sub-base), éste se desconecta, la matriz de rigidez se modifica y se ejecuta un nuevo análisis. Generalmente se necesitan entre 4 y 8 iteraciones para converger. Es sabido que el coeficiente de balasto no sólo depende de las propiedades del suelo, sino también de la geometría de la fundación y de la intensidad de las cargas aplicadas al terreno (10). Estos aspectos se consideraron en el modelo (4), de acuerdo a las leyes empíricas de Terzaghi (10).

Este es un problema no lineal y el principio de superposición no se puede aplicar. Sin embargo, para simplificar el análisis, el programa acepta un estado de carga único en que todas las cargas actúan simultáneamente.

El programa computacional desarrollado permite calcular las deformaciones y tensiones de una losa rectangular aislada, sometida a sollicitaciones de peso propio, deformación diferencial entre superficie y fondo producida por gradiente térmico y cargas de tráfico.

Para calibrar el modelo de elementos finitos, se hicieron mediciones del movimiento vertical en losas de seis meses de edad. Se midieron, también, el gradiente térmico de la losa, las deformaciones unitarias del hormigón de la losa, el coeficiente de balasto de la sub-base y las características del hormigón que incluyen: densidad, módulo de elasticidad, módulo de Poisson, coeficiente de expansión térmica y retracción hidráulica (4).

### III. MEDICIONES DE TEMPERATURA EN LAS LOSAS

Las mediciones de temperatura en una de las losas de hormigón, durante tres días en verano, se muestran en la Figura N°1. Se pueden ver las variaciones de la temperatura en la superficie de la losa entre el día y la noche. También se aprecia el gradiente térmico entre la superficie y el fondo de la losa.

Para las temperaturas mostradas en la Figura N°1, las diferencias máximas entre la superficie y el fondo de la losa son de  $17^{\circ}\text{C}$ , cuando la superficie está a mayor temperatura que el fondo, y  $8^{\circ}\text{C}$ , en el caso inverso. Las temperaturas máximas medidas fueron  $19,5^{\circ}\text{C}$  y  $9,5^{\circ}\text{C}$ , para cada uno de los casos anteriores, respectivamente. Este gradiente térmico induce una deformación diferencial entre la superficie y el fondo de la losa, produciendo una deformación cóncava hacia arriba cuando la superficie se encuentra a menor temperatura que el fondo, y una

deformación cóncava hacia abajo cuando la superficie se encuentra a mayor temperatura que el fondo. El modelo considera un gradiente térmico lineal en el espesor de la losa.

Como se aprecia en la Figura N°1, la variación de la temperatura no es lineal en la profundidad. Existe un gradiente térmico grande en los 5 cm superficiales de la losa, el cual va disminuyendo al aumentar la profundidad (4). Este gradiente térmico, mayor en la zona superficial, podría ser el causante de la fisuración superficial que existe en la mayoría de los pavimentos de hormigón en Chile.

#### IV. HUMEDAD EN LAS LOSAS

La humedad de las losas no se midió, por la dificultad que presentan estas mediciones. Se consideró que la superficie de la losa tenía una humedad similar a la humedad relativa del aire. En la zona central de Chile, la humedad relativa del aire puede llegar a menos de 20% al mediodía. El fondo de la losa se consideró saturado, por ser éste el estado en que se observa siempre cualquier material de sello, aunque el terreno aparezca seco (ejemplo: polietileno sobre suelo). Además, en Chile, normalmente los canales y acequias de riego corren paralelos a los caminos, proporcionando la humedad necesaria para este efecto.

Este gradiente hidráulico induce una retracción diferencial entre la superficie y el fondo de la losa, produciendo una deformación cóncava hacia arriba. Por lo tanto, la geometría de la losa, con gradiente térmico nulo, no es plana.

#### V. TENSIONES EN LAS LOSAS

Las características del clima en Chile producen deformaciones de alabeo en las losas, además de las deformaciones volumétricas del material.

Es importante ajustar los métodos de diseño para las condiciones locales. Cambios en las características del clima con respecto al clima existente en las regiones donde se desarrollan los métodos de diseño empíricos, pueden inducir a errores. En el caso de métodos de diseño semi-empíricos, como el propuesto por la Portland Cement Association (PCA) (11), las condiciones de clima se podrían introducir al método.

El método PCA (11) de diseño de pavimentos de hormigón menciona el alabeo y dice que su efecto es de dos tipos: resulta en una pérdida de soporte en los bordes de la losa y genera tensiones de compresión en el fondo de la losa. Como el alabeo es un fenómeno de largo plazo, sus efectos son influenciados en forma importante por la fluencia lenta del hormigón (creep). También este método señala que la existencia de condiciones térmicas e hidráulicas diferenciales entre la superficie y el fondo de la losa (gradientes), sumado a la inseguridad con respecto a cuál es la posición de tensión cero, hace difícil el cálculo o medición de las tensiones con algún grado de confianza

o con posibilidad de verificación y que, en la actualidad, la información existente de las magnitudes de estas tensiones no permiten incorporar estos efectos en el procedimiento de diseño.

La geometría normal de la losa, sin gradiente térmico, es una deformación cóncava hacia arriba producida por el gradiente hidráulico (3, 4, 5). El gradiente térmico se suma al gradiente hidráulico, produciendo el efecto de curvar más la losa cóncava hacia arriba cuando la temperatura de la superficie es menor que la del fondo (durante la noche) y de aplanar la losa cuando la temperatura de la superficie es superior que la del fondo (durante el día). Al calibrar el modelo de elementos finitos, se determinó que el gradiente hidráulico es equivalente a un gradiente térmico de  $17,5^{\circ}\text{C}$ , con la superficie de la losa más fría que el fondo (en el peor de los casos considerados) (4, 5). Es la opinión del autor de que la alta variación de temperatura entre el día y la noche que se produce en nuestro país, al cambiar la geometría de la losa de cóncava a convexa en un tiempo de 24 horas (alternando las tensiones de tracción a compresión y vice-versa), evita que el efecto de creep alivie las tensiones como supone el método de diseño PCA (11). Esto hace que las losas se alabeen durante toda su vida.

### VI. ESTUDIO DE SENSIBILIDAD

Utilizando el modelo de elementos finitos, se hizo un estudio de sensibilidad de los principales parámetros de diseño de pavimentos de hormigón (espesor de la losa, largo de la losa, coeficiente de balasto de la sub-base y módulo de elasticidad del hormigón), en las tensiones inducidas en la losa de hormigón (4). En ese estudio no se incluyeron cargas de tráfico. Los resultados se muestran en la Figura N°2, y se puede apreciar que las tensiones en la losa aumentan al aumentar el largo de la losa, al disminuir el espesor, al aumentar el módulo de elasticidad del hormigón y al aumentar el coeficiente de balasto de la sub-base.

### VII. CARGAS DE TRAFICO

Las tensiones inducidas en el pavimento por las cargas de tráfico están relacionadas con la magnitud de la carga, dimensiones de la losa, y relación entre el largo de la losa y distancia entre ejes de vehículos pesados. La distancia entre el eje delantero y el primer eje trasero de un camión puede variar entre 3,5 m y 6,0 m. Esto hace posible que una losa deformada cóncava pueda ser cargada en ambos extremos, simultáneamente, induciendo grandes tensiones en ella (Figura N°3).

Con el modelo de elementos finitos fue posible calcular las tensiones de tracción en el hormigón de la losa, producidas por gradiente térmico, hidráulico y cargas de tráfico. Para estas últimas se analizaron las cinco configuraciones más críticas (3, 4, 5).

Los casos con las tensiones máximas de tracción en la cara superior e inferior fueron B y D, de la Figura N°3, respectivamente. En todos los casos se considera al vehículo pisando con su rueda exterior en el borde longitudinal

de la losa. Es interesante la configuración E, puesto que las tensiones no dependen de la relación distancia entre ejes y largo de la losa, sino que del peso propio de la losa, sus dimensiones y su geometría. Es la impresión del autor que este sería el caso más crítico en falla por fatiga, por la gran cantidad de aplicaciones de carga que recibe el pavimento en estas condiciones.

Las tensiones máximas de tracción calculadas con el modelo para estas tres configuraciones, en una losa de 4,5m de largo y 250mm de espesor, sobre una sub-base con un coeficiente de balasto de  $40\text{kg/cm}^3$  y con propiedades del hormigón normales para un hormigón de pavimentos (3, 4, 5), fueron:

Configuración B:  $53,0\text{ kgf/cm}^2$  ( $5,30\text{ N/mm}^2$ ) en la cara superior.

Configuración D:  $13,3\text{ kgf/cm}^2$  ( $1,33\text{ N/mm}^2$ ) en la cara inferior.

Configuración E:  $31,4\text{ kgf/cm}^2$  ( $3,14\text{ N/mm}^2$ ) en la cara superior.

### VIII. TRANSFERENCIA DE CARGA ENTRE LOSAS

En Chile, los pavimentos de hormigón se diseñan y construyen sin barras de traspaso de carga en las juntas transversales. El traspaso de carga, entre losas, se deja a la trabazón entre los áridos en la grieta de retracción. Esto es aceptado por la mayoría de los métodos de diseño.

En el clima chileno, mostrado anteriormente, la grieta causada por retracción es muy ancha y no permite que la trabazón funcione, incluso para largos de losa de 4,5 metros. Generalmente el ancho de las grietas de retracción sigue un patrón. La primera grieta de retracción se forma cada cinco o seis paños y es la grieta más ancha. Después se forman las grietas en la junta central de los paños unidos y es menor que la primera, y luego se forman las últimas grietas en cada junta y son las más pequeñas. El ancho de estas grietas de retracción, especialmente el de la primera formada, no permite que funcione la trabazón entre los áridos y, por lo tanto, la trabazón no colabora en el traspaso de carga entre losas adyacentes. Esta falta de traspaso de carga permite movimiento vertical diferencial entre losas.

La Figura N°4 muestra el desplazamiento vertical entre dos losas de seis meses de edad, medido en un camino. Se aprecia que la magnitud es del orden de 3,0 mm. Este movimiento es debido al alabeo y muestra que no existe ningún elemento que lo impida, cosa que debería hacer la trabazón. En Chile se han medido movimientos diferenciales entre losas de 3,9 mm (2). Se considera que con un movimiento diferencial vertical entre losas de hasta 0,2 mm, la trabazón está funcionando. Un movimiento diferencial vertical de más de 0,4 mm significa que el traspaso de carga no existe y que el camino ha fallado (12).

Tal vez la solución para asegurar un apropiado traspaso de carga entre losas, en un clima como el chileno, sería utilizar barras de traspaso de carga en las juntas transversales de pavimentos de hormigón. Es la opinión del autor que esta solución no es tan simple. Los alabeos de las losas, en estas condiciones de clima, podrían inducir tensiones muy altas en las losas, producto de la rigidez de las barras de traspaso de carga. Se debería realizar investigación de este problema.

### IX. SELLO DE JUNTAS

Un movimiento diferencial vertical entre losas adyacentes de 4,0 mm, significa una tensión muy alta en el material de sello de juntas transversales. Estos sellos se diseñan normalmente para un movimiento longitudinal (ancho de la junta), producido por variaciones anuales de temperaturas entre invierno y verano, del orden de 2,3 mm. Las variaciones diarias de temperatura producen un movimiento de la junta del orden de 1,4 mm. La frecuencia de estos dos movimientos es uno al año o uno diario, respectivamente. La frecuencia del movimiento diferencial vertical de 4,0 mm, es uno por cada eje de vehículo pesado que pase cuando la losa se encuentra alabeada cóncava hacia arriba.

Estos grandes desplazamientos y la alta frecuencia con que se producen, rompen el sello en un tiempo corto. Este problema también se debería investigar, y a criterio del autor, también la geometría del sello. Actualmente se recomienda que el sello tenga una profundidad igual al ancho del surco donde se coloca. En el caso del movimiento diferencial vertical, este material funcionará al corte por la forma geométrica que tiene (viga corta). Si se diseñará con un espesor menor funcionaría en flexión y tal vez su duración sería mayor.

### X . JUNTA LONGITUDINAL ENTRE PAVIMENTO Y BERMA

Otro problema importante que se presenta en los pavimentos de hormigón que tienen este tipo de alabeo en sus losas, es la junta entre las losas y la berma. Esta junta es una grieta imposible de sellar debido al movimiento de las losas y a que no se puede adherir ningún tipo de sello a una berma granular, aunque tenga un sello asfáltico. Esta grieta está siempre abierta y recibiendo toda el agua lluvia que escurre del pavimento. La única solución para este problema, y prevenir el ingreso del agua al suelo bajo el pavimento, es contar con un muy eficiente sistema de drenaje a lo largo del camino, en la orilla del pavimento.

### XI. CONCLUSIONES

Como se ha visto, existen algunas implicancias del tipo de clima en el diseño de pavimentos de hormigón, específicamente en el caso de climas con grandes variaciones de temperatura entre el día y la noche y bajas humedades relativas. Entre estas se pueden señalar las siguientes:

- Las losas se alabean cóncavas hacia arriba y las tensiones en el hormigón son bastante más altas que las tensiones consideradas por los métodos de diseño usuales.
- La relación entre el largo de losas y la distancia entre ejes de vehículos pesados es importante para las magnitudes de las tensiones en el pavimento. Losas más cortas reducirían estas tensiones. Del estudio de sensibilidad se puede concluir que de los cuatro factores estudiados, los más importantes

son el largo de la losa y su espesor. El coeficiente de balasto y el módulo de elasticidad del hormigón son menos importantes. En estos dos últimos casos, a menor rigidez del hormigón y/o del terreno, menores son las tensiones inducidas por alabeo.

- La trabazón del árido, como mecanismo de traspaso de carga entre losas, no funciona con este tipo de clima.
- El material de sello de juntas transversales falla prematuramente, permitiendo el ingreso de agua a la sub-base, debido al alabeo y al movimiento relativo vertical entre losas. Se debería investigar la forma geométrica del sello de juntas.
- Se produce una grieta longitudinal entre el pavimento y la berma, que es imposible de sellar, producida por el alabeo y tráfico, que obligaría a contar con un muy eficiente sistema de drenaje al borde del pavimento.

### AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo fue posible gracias a un grant de investigación proporcionado por la Dirección de Investigación de la Pontificia Universidad Católica de Chile, y a la Dirección de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas por la autorización para ejecutar mediciones en caminos de la red vial. Se agradece también al British Council por la beca otorgada al autor y que le permitió estudiar formas de recarpetear pavimentos de hormigón cuyas losas se alabean cóncavas hacia arriba, evitando reflexión de grietas y permitiendo el sellado del pavimento para evitar el ingreso de agua.

### REFERENCIAS

1. De Solminihac, H., Covarrubias, J.P. y Larraín, C. "Diseño y Desarrollo de Mediciones de Problemas Físicos en Losas de Hormigón de Pavimentos". V Jornadas Chilenas del Hormigón. Concepción, Octubre 1984.
2. Covarrubias, J.P., de Solminihac, H., Larraín, C. "Estudio experimental del movimiento diferencial en losas de hormigón de pavimentos". Apuntes de Ingeniería, N° 19, Abril - Junio 1985, 5 - 17.
3. Covarrubias, J.P., Rodríguez-Roa y Larraín, C. "Análisis de losas de hormigón de pavimentos por elementos finitos. Resultados Obtenidos". V Jornadas Chilenas del Hormigón. Concepción, Octubre 1984.
4. Larraín, C. "Análisis Teórico Experimental del Comportamiento de Losas de Hormigón de Pavimentos". Tesis para obtener el grado de Magister en Ciencias de la Ingeniería. Pontificia Universidad Católica de Chile, 1985.

5. Larraín, C., Covarrubias, J.P. y Rodríguez-Roa, F. "Analysis of Concrete Slab Performance in Pavements Using a Finite Element Model". The 1986 International Conference on Bearing Capacity of Roads and Airfields, Plymouth, Inglaterra, 16 al 18 de septiembre 1986, 135-144.
6. Zienkiewics, O.C., Cheung, Y.K. "The Finite Element Method for Analysis of Elastic Isotropic and Orthotropic Slabs". Proc. Inst. Civ. Eng. 28, 1964, 471-488.
7. Przemieniecki, J.S. Theory of Matrix Analysis. Me Graw-Hill Book Company, New York, 1968.
8. Zienkiewicz, O.C. The Finite Element Method. Me Graw-Hill, New York, 1977.
9. Rodríguez-Roa, F., Gavilan, C. y Larraín, C. "Análisis Numérico de Losas de Fundación de Estructuras Aporticadas". VII Seminario Panamericano de Estructuras. Santiago, Chile, 1983.
10. Terzaghi, K. "Evaluation of Coefficient of Subgrade Reaction". Geotechnique, Vol.5, 1955, 297-326.
11. PCA. "Thickness Design for Concrete Highway and Street Pavements". Portland Cement Association, Illinois, 1984.
12. Fernández, R. "Seminario de Diseño de Pavimentos: Pavimentos Rígidos", Aportes Técnicos, Instituto Chileno del Cemento y del Hormigón, Santiago, Chile, 1982.

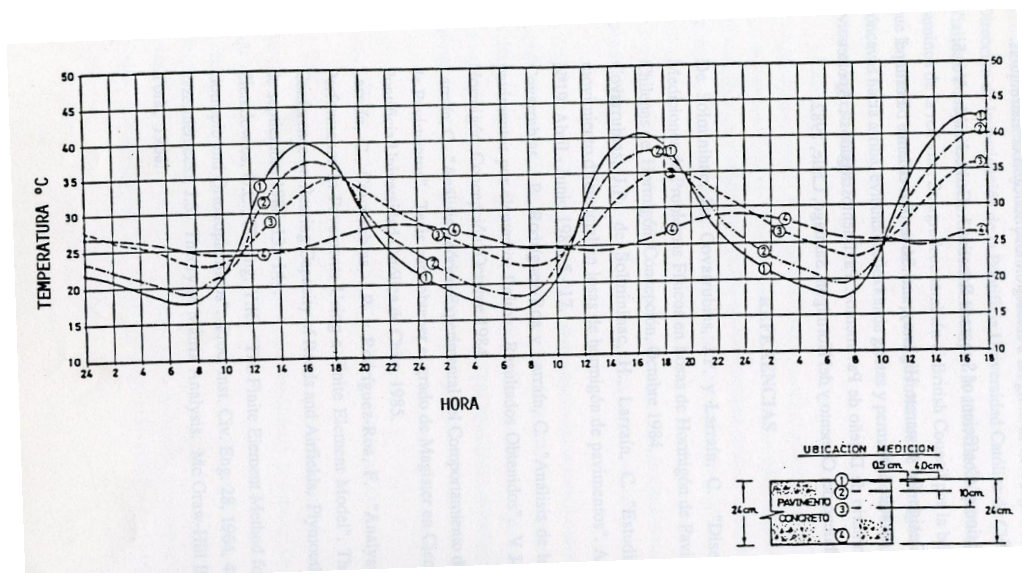
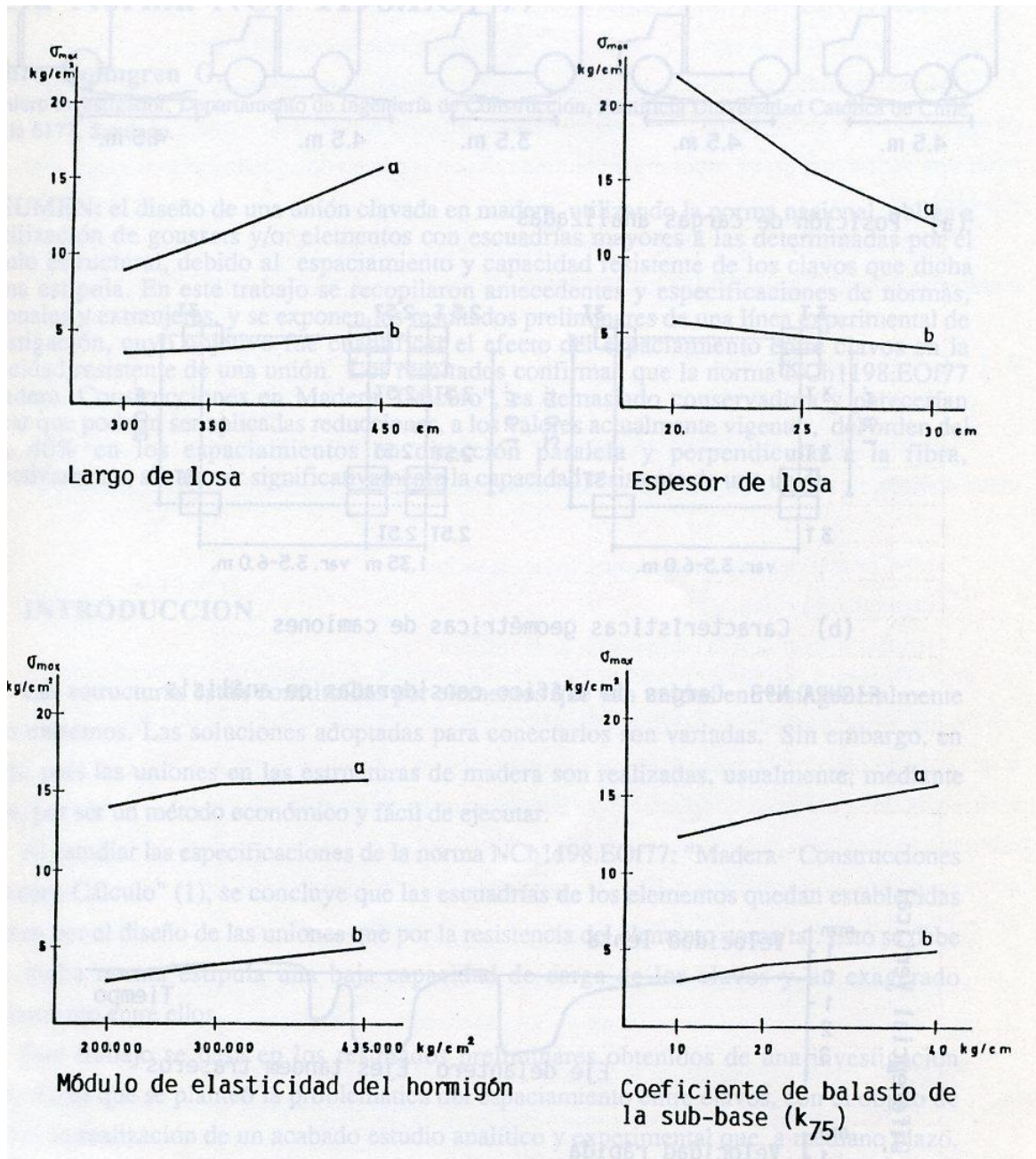


Figura 1 Variaciones de temperatura en losa de hormigón de pavimento ( 25 Enero al 27 Enero de 1983).





- (a) Tracción en cara superior (cóncava hacia arriba)
- (b) Tracción en cara inferior (cóncava hacia abajo)

Figura 2 Estudio de sensibilidad considerando solamente peso propio de la losa.

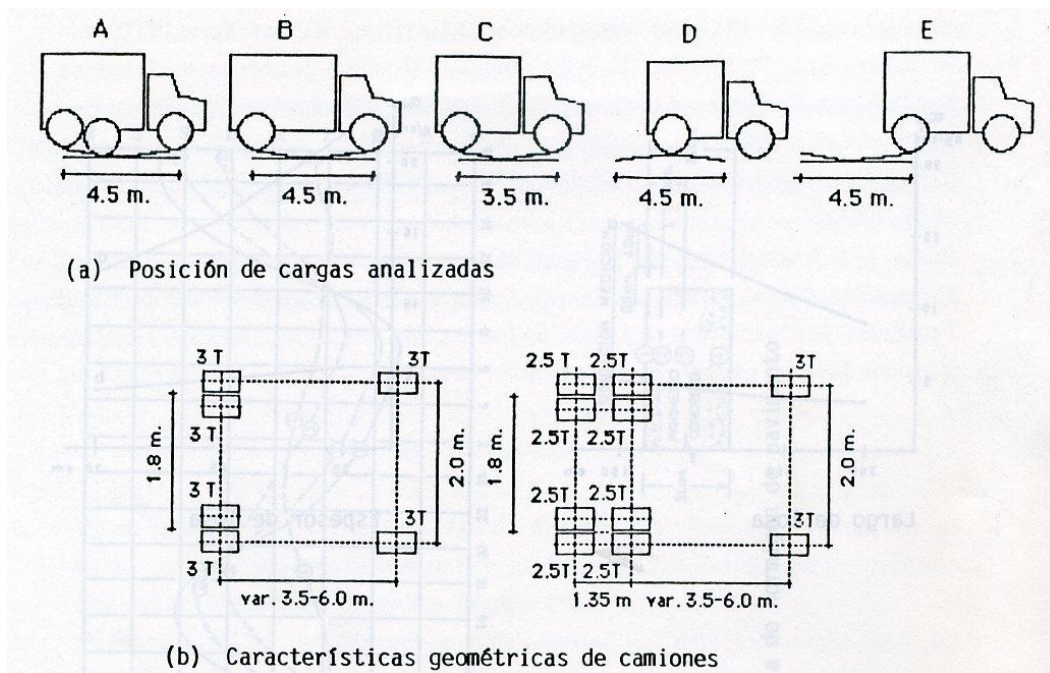


Figura 3 Movimiento diferencial vertical entre dos losas con paso de un camión.

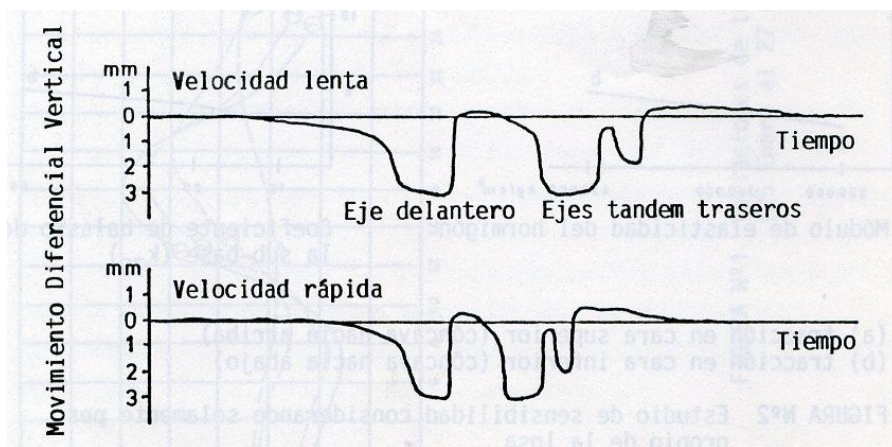


Figura 4 Movimiento diferencial vertical entre dos losas con pasos de un camión