

COMISION DE DISEÑO Y EVALUACION DE PAVIMENTOS

DETERMINACION DEL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CARGA " J " EN PAVIMENTOS DE HORMIGON CHILENOS

Preparado para :
Instituto Chileno del Cemento y del Hormigón

Preparado por:
APSA
Consultores en Administración de Pavimentos

CAMARA CHILENA DE
LA CONSTRUCCION
Centro Documentación

- 06360 -

Septiembre, 1996

Cámara Chilena de la Construcción
Corporación de investigación de la Construcción

RESUMEN EJECUTIVO

Nombre del Informe: Determinación del Coeficiente de Transferencia de Carga J en Pavimentos de Hormigón Chilenos		Código Interno Proyecto (APSA): 96-01-01
Nombre del Proyecto al cual Pertenece: Evaluación y Calibración del Método de Diseño AASHTO 93 para Pavimentos de Hormigón en Condiciones Chilenas.		Fecha (última modificación): 13 de Diciembre de 1996
Identificación del Mandante: Instituto Chileno del Cemento y del Hormigón San Pío X n° 2455, Providencia. Fono-Fax 2326777	Profesional Responsable: Ing. Juan Pablo Covarrubias	Tipo de Versión del Informe: Final
Identificación del Ejecutante: APSA Administración de Pavimentos Las Encinas n° 3296, Ñuñoa. Fono 272 2461, 271 0180, Fax 272 6701	Ing. Responsable: Ricardo Salsilli Ing de Proyecto: Enrique Forero	Formato de Presentación: Final
Observaciones:		Clasificación: Estudio de Investigación
Observaciones:		Número de Páginas: 57.
Observaciones:		Material Anexo: No.

Resumen:

El objetivo de este estudio es determinar recomendaciones para el coeficiente de transferencia de carga J en pavimentos JPCP chilenos, además de servir de base para un estudio mayor que calibra globalmente todas las variables del método AASHTO 93 para condiciones chilenas. El estudio empleó como fuente relaciones teóricas y/o empíricas consistentes con el método de diseño AASHTO, más una base de datos de transferencia de carga (TC) de caminos locales (IDIEM). A lo anterior se agrega una serie de mediciones con Deflectómetro de Impactos (FWD), a fin de conocer la evolución en el tiempo y variabilidad de la TC, y poder así validar debidamente la base de datos.

En líneas generales, el procedimiento utilizado para determinar J consistió en realizar una revisión del método de determinación y recomendaciones AASHTO acerca del tema, para luego aplicar ambos a las condiciones específicas chilenas. Esta revisión determinó que los factores J que AASHTO recomienda poseen una doble procedencia: una inicial a partir de relaciones de tensiones y una segunda, no menos importante y no especificada claramente, de tipo intuitivo.

La aplicación de la relación de tensiones original AASHTO presenta múltiples complejidades e inconsistencias que hacen definitivamente imposible su empleo en pavimentos como los chilenos. Por tal motivo, se debió optar por otras metodologías que, siendo fieles a los principios AASHTO, no presentan estos problemas. Después de varios intentos con relaciones tensionales, se decidió optar por una relación de deformaciones en que el pavimento AASHO quedó representado por uno equivalente en JPCP, en términos de transferencia de carga de deformación (TC).

Los resultados obtenidos permitieron generar una relación J vs TC consistente y respaldada por lineamientos básicos que aparecen en la guía AASHTO. A partir de ésta y de la base de datos de TC previamente validada, fue posible generar valores de J para cada uno de los pavimentos incluidos en dicha base de datos. En la determinación se incluye el efecto estacional y el efecto de la variación de TC a lo largo del día, ponderado según nivel de tránsito acumulado.

Los resultados finales muestran una clara tendencia geográfica: el factor de transferencia de carga correspondiente a la zona centro sería $J = 3.6$, mientras que más al sur se haría recomendable el empleo de $J = 3.3$. En todo caso, tal como se señaló al principio, estos valores no pueden ser vistos como definitivos, sino como los mejores valores que la información disponible a la fecha permite generar. Los valores finales podrán ser obtenidos luego de la calibración general del método.

INDICE

RESUMEN EJECUTIVO	i
INDICE	ii
1 INTRODUCCIÓN	1
2 ANTECEDENTES TEÓRICOS ACERCA DEL PARÁMETRO J	3
2.1 Modelos Iniciales de la Prueba AASHO	3
2.1.1 Modelo Empírico	3
2.1.2 Modelo Teórico-Empírico (1961)	4
2.1.3 Obtención de la Ecuación de Diseño para Pavimentos de Hormigón (1961)	6
2.2 El Factor J en el Método de Diseño AASHTO	7
2.2.1 Recomendaciones del Manual de Diseño AASHTO 93	7
2.2.2 Metodología de Cálculo Empleada en el Apéndice KK	9
3. DETERMINACIÓN DE UN MÉTODO PARA OBTENER EL FACTOR DE TRANSFERENCIA DE CARGA J EN CONDICIONES CHILENAS	14
3.1 J a Partir de la Relación de Tensiones Dada por AASHTO	14
3.2 Obtención de J a Partir de una Relación de Tensiones de Esquina	20
3.3 Búsqueda de una Solución Alternativa	22
3.3.1 Solución Alternativa por Tensiones	22
3.3.2 Solución Alternativa por Deformaciones	26
4 VALIDACIÓN DE LA BASE DE DATOS EXISTENTE	30
4.1 La Base Datos Existente	30
4.2 La TC en la Junta Instrumentada como estimador de la TC media	34
4.3 Evolución de la TCI en el Tiempo y Verificación Recíproca de los Métodos de Base de Referencia Profunda (BRP) y FWD para Medición de TC	42
4.4 Consideraciones Finales	49
5. GENERACIÓN DE VALORES RECOMENDADOS PARA J EN PAVIMENTOS CHILENOS	50
5.1 Descripción General de la Metodología de Cálculo	50
5.2 Valores Finales de J	54
BIBLIOGRAFIA	56

1 INTRODUCCIÓN

De acuerdo a estudios preliminares efectuados en el país, el parámetro J, o coeficiente de transferencia de carga del método de diseño AASHTO 93, se presentaría como uno de los principales responsables del deficiente ajuste observado entre la predicción de la ecuación y lo observado en terreno.

Por ejemplo, en la memoria de título "Análisis del Método de diseño AASHTO 1993 para pavimentos de hormigón en Chile" (1) se establece lo siguiente:

"... En términos generales, el problema detectado consiste en una predicción de tránsito sistemáticamente inferior al tránsito observado en la realidad. Esto significa que el comportamiento de los pavimentos sería mejor que el que predice la ecuación de diseño, o, puesto de otro modo, significaría que los diseños proyectados con este método estarían derivando en espesores de losa sistemáticamente superiores al estrictamente necesario".

"... La inclusión de valores de transferencia de carga inferiores al valor promedio empleado en Chile, resulta en una corrección del error sistemático observado y, por tanto, un muy buen ajuste de la ecuación de diseño. De este modo, existe la posibilidad que la transferencia de carga esté siendo subvalorada".

Finalmente se recomienda:

"... Realizar un estudio, por ejemplo a través de retroanálisis, de la transferencia de carga en losas de pavimento chilenas, de modo tal de obtener recomendaciones y rangos reales del coeficiente J para pavimentos chilenos. Un análisis de este tipo permitiría determinar si esta variable está o no siendo sobrevalorada y, por tanto, averiguar qué participación le corresponde en el error sistemático encontrado en este estudio."

Vistos estos antecedentes, y el alto costo que involucran errores de este tipo, estudios como el presente se ven plenamente justificados.

Los objetivos que aquí se persiguen son determinar de algún modo si el J está siendo sobreevaluado y, en tal caso, llegar a generar una tabla de recomendaciones de valores de J para pavimentos chilenos, a partir de información empírica de transferencia de carga nacional. En este sentido, este estudio es parte de uno mayor que busca la calibración general del método AASHTO en Chile.

El factor J proviene de una extensión realizada al método AASHTO en 1972, y busca que el diseño incluya la capacidad de un determinado pavimento de transferir (distribuir) la carga de tránsito a través de sus discontinuidades, como son juntas y grietas. Los dispositivos de transferencia de carga, la trabazón mecánica, la presencia de bermas de hormigón y el sobrecancho

de calzada tienen todos distintos efectos sobre J, y, por tanto, en cualquier diseño de pavimentos de hormigón.

La metodología aplicada en este estudio tiene como primer requisito conservar los criterios del método de diseño AASHTO. Para tal efecto, se comenzó con una revisión del modo de obtención y recomendaciones acerca de J por parte de AASHTO. Así, a partir de la relación básica entre pavimentos AASHO y otros pavimentos, se buscó una relación entre el J y la transferencia de carga de deflexiones medida en porcentaje (TC).

Lo anterior tiene el fin de poder aplicar la información contenida en una gran base de datos de mediciones en terreno de esta variable. El estudio incluye una adecuada validación de las mediciones, aplicando equipos de medición de moderna tecnología.

Finalmente, se llega a determinar valores de J de acuerdo a zonas geográficas.

2 ANTECEDENTES TEÓRICOS ACERCA DEL PARÁMETRO J

2.1 Modelos Iniciales de la Prueba AASHO

Luego de los dos años de tránsito (1959-1960), se analizaron los datos y se obtuvieron dos modelos fundamentales:

2.1.1 Modelo Empírico

Son relaciones empíricas entre espesor de losa, magnitud de carga por eje, número de repeticiones de carga y pérdida de serviciabilidad del pavimento, para las condiciones específicas de la prueba AASHO (por ejemplo, factores climáticos, de los materiales, etc.). El modelo empírico original derivado de la prueba AASHO aparece en la Ec.1 y es el mismo para pavimentos rígidos y flexibles.

$$\text{Log}(W) = \text{Log}(\rho) + \frac{G}{\beta} \quad (1)$$

Donde:

- W = Número de repeticiones de carga para alcanzar el índice de serviciabilidad final.
- ρ = Una función de las variables de diseño y de carga que denotan el número esperado de repeticiones de carga para llegar a un índice de serviciabilidad de 1.5.
- G = Una función de la razón entre la pérdida de serviciabilidad alcanzada en el instante final y la pérdida potencial para llegar a un índice de serviciabilidad de 1.5.
- β = Una función de las variables de diseño y de carga que influyen en el comportamiento de la curva de serviciabilidad p v/s W.

En pavimentos rígidos:

$$\text{Log}_{10}(\rho) = 5.85 + 7.35 \text{Log}(D+1) - 4.62 \text{Log}(L_1 + L_2) + 3.28 \text{Log}(L_2) \quad (2)$$

$$G = \text{Log}_{10} \left[\frac{(P_o - P_f)}{(4.5 - 1.5)} \right] \quad (3)$$

$$\beta = 1.00 + \frac{3.63 (L_1 + L_2)^{5.20}}{(D+1)^{8.46} L_2^{3.52}} \quad (4)$$

Donde:

- D = Espesor de la losa de hormigón, [in].
 L₁ = Peso del eje simple simple o eje doble, [kips].
 L₂ = Código de eje (1 para eje simple y 2 para eje tándem).
 p_o = Índice de serviciabilidad inicial.
 p_t = Índice de serviciabilidad final.

Este modelo de comportamiento de 1961 es 100% empírico y por tanto depende completa y totalmente de las condiciones de diseño, clima, subbase, edad y tránsito observadas en la prueba AASHO.

2.1.2 Modelo Teórico-Empírico (1961)

Para extender la Ec. 1 a otras condiciones y materiales distintos a los de la prueba AASHO, se desarrolló un modelo teórico-empírico que relaciona W con la razón S_C/σ y cuya expresión aparece en la Ec. 5. En ésta, S_C representa el valor promedio de resistencia a la flexotracción, y σ es la tensión de esquina calculada a partir de la ecuación de Spangler.

$$\text{Log}(W') = A + B \times \text{Log} \left[\frac{S_C}{\sigma} \right] \quad (5)$$

Donde:

- W' = Número de ejes equivalentes requeridos para obtener una serviciabilidad final p_t. (En la regresión, W' fue calculado a partir de la Ec. 1).
 A, B = Constantes de regresión.
 S_C, σ = Según descritas anteriormente.

La ecuación de Spangler que se utilizó en la determinación de σ es la siguiente:

$$\sigma = 3.2 \frac{P}{h^2} \left[1 - \left(\frac{a\sqrt{2}}{\ell} \right) \right] \quad (6)$$

$$\ell = \sqrt[4]{\frac{E h^3}{12(1-\mu^2)k}} \quad (7)$$

Donde:

- P = Carga total aplicada.
h = Espesor de la losa.
 ℓ = Radio de rigidez relativa losa - suelo de fundación.
a = Radio del área cargada
E = Módulo de elasticidad del hormigón.
 μ = Coeficiente de Poisson del hormigón.
k = Módulo de reacción de la subrasante.

Resulta importante señalar que la Ec. 6, desarrollada por Spangler en 1942 a partir de relaciones teóricas y mediciones de laboratorio, no incluye ninguna "J" sino una constante igual a 3.2. Además, la tensión que calcula corresponde a la tensión máxima que produce una carga en la esquina de una losa libre, siendo que todas las juntas de la prueba AASHO poseían barras de refuerzo. El esfuerzo de esquina calculado a partir de esta ecuación resulta, en efecto, en esfuerzos del orden de tres veces el observado a través de mediciones con "strain gages" para mismas condiciones de carga*.

Por otra parte, debe señalarse que la condición de carga crítica no fue la de esquina, sino más bien se produjo cuando la carga se encontraba en el borde, a unos 6 pies (1.8 m) de la esquina (losas JPCP de espesores 9.5 y 12 in [24.1 y 31.75 cm]). Aparentemente, la ecuación fue empleada de todas formas por su simplicidad y por guardar una buena correlación con los esfuerzos máximos medidos (condición de carga en la esquina y condición de carga crítica), pese a la diferencia de magnitud.

De una u otra forma, la incorporación de este modelo permitió generar tres rectas (Log W') v/s (Sc/σ), para valores terminales de serviciabilidad Pt = 1.5, 2.0 y 2.5; generándose así valores para la constante B (Ec. 5) de 3.74; 3.58 y 3.42, respectivamente. Así, se obtuvo la siguiente relación entre B y p_t:

$$B = 4.22 - 0.32 \times p_t \quad (8)$$

* Esto puede ser verificado tomando los valores de la Figura 187, p 233, de "The AASHO Road Test, Report 5, Pavement Research" y comparándolos con los resultados que arroja la ecuación de Spangler para las condiciones de la prueba AASHO.

2.1.3 Obtención de la Ecuación de Diseño para Pavimentos de Hormigón (1961)

Para obtener a la ecuación de diseño se derivó la Ec. 5 y se reemplazó el valor de B por el indicado en la Ec. 8. La idea de aplicar el diferencial busca obtener la "diferencia de comportamiento" entre un pavimento de características AASHO y otro de características distintas, basándose en el supuesto que, a una misma razón (S_c/σ), correspondería un mismo comportamiento.

$$d \left[\text{Log}(W') \right] = d \left[A + B \times \text{Log} \left[\frac{S_c}{\sigma} \right] \right] \quad (9)$$

$$\text{Log}(W') - \text{Log}(W) = B \times \left[\text{Log} \left[\frac{S_c'}{\sigma'} \right] - \text{Log} \left[\frac{S_c}{\sigma} \right] \right] \quad (10)$$

$$\text{Log}(W') = \text{Log}(W) + (4.22 - 0.32 Pt) \times \left[\text{Log} \left[\frac{S_c'}{\sigma'} \right] - \text{Log} \left[\frac{S_c}{\sigma} \right] \right] \quad (11)$$

Donde:

- W' = Número de repeticiones de ejes de carga requerido para alcanzar un nivel de serviciabilidad final Pt en un pavimento similar al de la prueba AASHO pero con propiedades físicas descritas por S_c'/σ' .
- W = Número de repeticiones de ejes de carga, calculado a partir de la Ec. 1, requerido para alcanzar un nivel de serviciabilidad final Pt en un pavimento de la prueba AASHO, con propiedades físicas descritas por S_c/σ .
- S_c'/σ' = Razón de resistencia para pavimentos con propiedades modificadas.
- S_c/σ = Razón de resistencia para pavimentos de la prueba AASHO. Se obtiene con $S_c = 690$ psi y σ calculado a partir de la ecuación de Spangler (Ec 6) con $k = 60$ pci, $E_c = 4.2 \cdot 10^6$ psi, $\mu = 0.2$, $a = 7.07$ in y $P = 9000$ lb.

La ecuación de diseño presentada en 1961 debe ser empleada para diseñar pavimentos con juntas reforzadas con barras y, en lo posible, en condiciones climáticas similares a las de la prueba AASHO. Por esta razón, la ecuación ha sufrido múltiples extensiones y ajustes posteriores a 1961, que buscan expandir los resultados de la prueba a otras condiciones, materiales, etc. En la extensión realizada en 1972, se incorporó el coeficiente de transferencia de carga J, junto con recomendaciones para el diseño y reforzamiento de juntas.

2.2 El Factor J en el Método de Diseño AASHTO

La incorporación de J busca extender los resultados de la prueba AASHTO a distintos tipos de pavimentos, pues resulta obvio que el comportamiento de pavimentos con condiciones de borde distintas a las de la prueba AASHTO (distintos tipos de berma, distintos dispositivos de transferencia de carga en las juntas) influyen de modo significativo en las tensiones, que a su vez están incluidas en la Ec. 5. De este modo, es evidente que la primera ecuación de diseño y base de todas las posteriores no podría predecir adecuadamente el comportamiento de un pavimento, por ejemplo, con trabazón mecánica en las juntas.

Específicamente, la modificación consistió en cambiar la constante 3.2 de la ecuación de Spangler (Ec. 6) por la variable J. De este modo, quedó inmediatamente definido que, para las condiciones de la prueba AASHTO, el valor a adoptar es $J = 3.2$, conservándose de este modo inalteradas todas las expresiones validadas en 1961 para aquellas condiciones (Ecs. 5 y 11, por ejemplo).

El problema es definir valores de J para condiciones de borde distintas a las de la prueba AASHTO; más aún, definir qué metodología es teóricamente adecuada para calcularlos y, por último, cómo confirmar que dichos valores son los apropiados.

2.2.1 Recomendaciones del Manual de Diseño AASHTO 93

Con respecto al J, el método AASHTO 1993 para pavimentos de hormigón cita textualmente (2):

"El coeficiente de transferencia de carga, J, es un factor usado en el diseño de pavimentos rígidos para valorar la capacidad de la estructura de pavimento de transferir (distribuir) las cargas a través de las discontinuidades, como son juntas y grietas. Los sistemas de transferencia de carga, la trabazón mecánica y la presencia de berma pavimentada tienen todos distinto efecto en este valor. Generalmente, el valor de J asociado a un conjunto de condiciones (por ejemplo, pavimento de hormigón con juntas y berma de hormigón) aumenta [es decir, disminuye la eficiencia de la transferencia de carga] a medida que las cargas de tránsito se incrementan ya que, al aumentar el número de repeticiones, la calidad de la trabazón mecánica entre los áridos disminuye. La tabla 2.6 [Tabla 1] establece rangos de coeficientes de transferencia de carga para diferentes condiciones desarrollados de la experiencia y de análisis tensionales mecanicistas".*

En el párrafo anterior se deja en evidencia que los valores de J tienen una "doble" procedencia, siendo la experiencia y el análisis mecanicista uno tan importante como el otro.

* Esto ocurre producto del desgaste y la desintegración ocasionados por el roce.

En la descripción del coeficiente J, AASHTO continúa señalando: "*Como guía general para el rango de valores de J, lo normal es que los valores más altos estén asociados a pavimentos con bajos valores de k, altos coeficientes térmicos [del hormigón], y grandes variaciones de temperatura*". ... "*Cada agencia debería, sin embargo, desarrollar criterios para sus propios áridos, condiciones climáticas, etc.*"

Por ende, aunque AASHTO no establezca ni ponga límites a cómo desarrollar esos criterios, queda claro que estudios como el presente son recomendados y aceptados dentro de la globalidad del método de diseño AASHTO.

Con respecto a los pavimentos con trabazón mecánica, el manual de diseño asevera que: "*El rango recomendado para pavimentos de hormigón simple sin reforzamiento en las juntas es de 3.8-4.4, que resulta superior al observado en pavimentos con otros dispositivos de transferencia de carga. Esto último se debe al mayor esfuerzo de corte que se desarrolla en las juntas sin barras y también a fin de incluir el aumento potencial de escalonamiento*" (3).

Tabla 1 Coeficientes de Transferencia de Carga J Recomendados por AASHTO 93 (4)

Tipo de Berma	Coeficientes de Transferencia de Carga Recomendados según Tipo de Pavimento y Condiciones de Diseño			
	Asfáltica		de Hormigón	
Dispositivo de Transferencia de Carga	Si	No	Si	No
Tipo de Pavimento:				
1. JCP* o JRCP	3.2	3.8-4.4	2.5-3.1	3.6-4.2
2. CRCP	2.9-3.2	N/D	2.3-2.9	N/D

A este respecto convendría señalar un aspecto muy importante: Aunque resulte confuso lo que significó conceptualmente la expresión de Spangler en la ecuación de diseño original, está claro que el 3.2 que la afecta no es por escalonamiento, pues en la prueba AASHO aquel

* JCP: "Jointed Concrete Pavement", pavimento de hormigón simple con juntas;
JRCP: "Jointed Reinforced Concrete Pavement", pavimento de hormigón reforzado con juntas;
CRCP: "Continuously Reinforced Concrete Pavement", pavimento de hormigón continuamente reforzado.

deterioro nunca existió debido a la protección de las juntas. Esto quiere decir que, definitivamente, el método de diseño AASHTO para pavimentos de hormigón no incluye de modo alguno el escalonamiento, conclusión que puede encontrarse en diversos estudios (5). Sin embargo, lo último no debe ser malinterpretado. Aquí no se está diciendo que la transferencia de carga no influya en el escalonamiento, sino que el escalonamiento no es una variable usada por AASHTO para predecir comportamiento.

En último caso, asumiendo (erradamente) que el factor J tuviera alguna dependencia con el escalonamiento, en el caso chileno sería incorrecto elevar su valor por dicho motivo. El escalonamiento es un deterioro que no se manifiesta con mucha intensidad en los pavimentos chilenos, o al menos así puede observarse en la mayoría de los tramos testigo IDIEM- Dirección de Vialidad, donde sólo dos de los 21 pavimentos presentan más de 2.5 mm promedio (6). Sin embargo, en los EEUU, los pavimentos de hormigón simple no tienen un comportamiento similar en esta materia. Por ejemplo, es digno de destacar que en la prueba AASHO, una junta quedó por error sin su reforzamiento: fue el único caso de escalonamiento medible en los dos años de toda la prueba, y fue de tipo severo. El resto fue escalonamiento que se presentó en las grietas cuando el nivel general de deterioro era avanzado (7).

2.2.2 Metodología de Cálculo Empleada en el Apéndice KK

El método AASHTO basa su tabla de recomendación de valores de J (Tabla 1) en los resultados de un análisis de tensiones y en la experiencia de la Task Force. En el apéndice KK del Volumen II del manual de diseño de 1986*, se detalla la metodología empleada en el cálculo de J a partir de tensiones. La relación empleada es la siguiente:

$$\frac{\sigma_{\max AASHO}}{\sigma_{Sp AASHO}} = \frac{\sigma_{\max C}}{\frac{J}{3.2} \times \sigma_{Sp C}} \quad (12)$$

donde,

- $\sigma_{\max AASHO}$ = Tensión máxima (carga en el borde) según método mecanicista en la condición de la prueba AASHO, conocida.
- $\sigma_{SpAASHO}$ = Tensión según Ec. de Spangler (Ec. 6) en la condición de la prueba AASHO, conocida.
- σ_{SpC} = Tensión según Ec. de Spangler (Ec. 6) en pavimento cualquiera, conocida
- $\sigma_{\max C}$ = Tensión máxima (carga en el borde) según método mecanicista en pavimento cualquiera, conocida.

* En 1993 no se editó Volumen II, manteniéndose como oficial la versión de 1986.

Al analizar esta relación, surgen aspectos difíciles de entender: ¿Por qué la relación $\sigma_{\max \text{ AASHO}} / \sigma_{\text{SpAASHO}}$ debería mantenerse constante? ¿Sinceramente, es acaso de esperar que esta relación se cumpla en pavimentos de otros tipos haciendo un simple ajuste lineal para J? ¿Es esto una realidad o una imposición?

La mejor forma de entender esta relación es volviendo a los resultados de la prueba AASHO. En ésta, midiendo con "strain gages", se encontró que las tensiones con carga en la esquina guardaban una relación lineal con las tensiones máximas, las que ocurrieron a su vez por lo general con la carga en el borde, a 6 pies (1.83 m) de la esquina*.

Si a este resultado se suma el hecho que la ecuación de Spangler era directamente proporcional a la tensión de esquina medida con "strain gages" (véase 2.1.2), se obtiene por transitividad que Spangler se correlaciona también linealmente con la tensión máxima. Ésta, más la simplicidad de la expresión de Spangler, serían dos importantes razones para incluir a Spangler en la Ec. 5, que a su vez se presenta como "tratando" de incorporar ciertos conceptos teóricos de fatiga (véase Sc/σ), pero de modo empírico (véase por ejemplo W').

De este modo, estos autores piensan que la justificación para incluir a Spangler en la Ec. 5, fue, aparte de su simplicidad, su correlación lineal con la tensión máxima más que con la de esquina, pues ese es el valor que generalmente se incluye cuando se habla de relaciones Sc/σ . Por otro lado, esta suposición se ve reforzada si se recuerda que el agrietamiento mayormente observado en la prueba AASHO fue el transversal, lo que concuerda con la tensión máxima debido a carga en el borde, y no con la de esquina, sobretodo en pavimentos con barras de traspaso de carga.

En resumen, dado que Spangler se correlacionaba bien con la tensión máxima (a 6 pies) y con la de esquina, resultaba lo mismo, pues la calibración se lograría de uno u otro modo.

Finalmente, la idea de la Ec. 12 sería encontrar un J que altere la ecuación de Spangler de modo tal de obtener un estimador de la tensión máxima, del mismo modo que Spangler habría estimado la tensión máxima en la prueba AASHO. Entonces, este valor podría usarse tan correctamente como fue empleado directamente Spangler en las condiciones de la prueba AASHO ($J = 3.2$), sin perder todo el trabajo de calibración ya realizado.

En el apéndice KK del Volumen II de la guía AASHTO 1986 no se detalla ninguno de los conceptos analizados anteriormente, exponiéndose solamente la ecuación y algunos detalles computacionales. El método computacional utilizado es de elementos discretos y consideró la carga de un eje de 18.000 libras.

* Esta correlación puede ser verificada comparando los resultados de tensión máxima del Loop 1, pista 2, que aparecen en la Tabla 90 y son modelados por la ecuación 107, p 237 de "The AASHO Road Test, Report 5, Pavement Research", con los resultados de carga en la esquina que aparecen en la figura 187, p 233 del mismo reporte.

Los resultados encontrados aparecen en la Tabla 2

Tabla 2 Coeficientes de Transferencia de Carga Computados para Distintas Condiciones de Diseño y Tipos De Pavimento (AASHTO Vol II, Tabla KK7)

BERMA:	ASFALTICA		DE HORMIGÓN	
Dispositivo de TC:	Si	No	Si	No
TIPO DE PAVIMENTO:				
JCP y JRCP	A. J = 3.2	A. J = 4.5	A. J = 2.8	A. J = 3.7
	B. J = 3.2	B. J = 4.1	B. J = 2.7	B. J = 3.6
	C. J = 3.2	C. J = 3.9	C. J = 2.7	C. J = 3.6
	D. J = 3.2	D. J = 5.2	D. J = 3.0	D. J = 4.0
	E. J = 3.2	E. J = 4.8	E. J = 2.9	E. J = 3.8
	F. J = 3.2	F. J = 4.5	F. J = 2.8	F. J = 3.7
CRCP	A. J = 2.9		A. J = 2.5	
	B. J = 3.0		B. J = 2.6	
	C. J = 3.1		C. J = 2.6	
	D. J = 2.6		D. J = 2.3	
	E. J = 2.8		E. J = 2.4	
	F. J = 2.8		F. J = 2.5	

- | | |
|---------------------------|---------------------------|
| A. h = 7 in, k = 100 pci | D. h = 7 in, k = 600 pci |
| B. h = 10 in, k = 100 pci | E. h = 10 in, k = 600 pci |
| C. h = 13 in, k = 100 pci | F. h = 13 in, k = 600 pci |

Cabe destacar que los resultados aquí obtenidos no son directamente los recomendados en el manual de diseño AASHTO 1993 (Tabla 1), pues la Task Force realizó "ajustes" que no aparecen en el apéndice KK: *"En general, la Task Force redujo el rango de las variables pero mantuvo el punto medio relativamente constante"* (8)

Sin embargo, al menos para los pavimentos JCP con berma asfáltica, la calibración de la Task Force parece haber hecho más que eso: el intervalo recomendado en la tabla de diseño (Tabla 1) es 3.8-4.4, mientras que en la Tabla 2 el rango que aparece computado para este mismo tipo de pavimento es 3.9-5.2. En términos sencillos, esto significa que, para este tipo de pavimentos, la Task Force no estuvo de acuerdo con los resultados computados y decidió reducirlos considerablemente.

Los resultados de la Tabla 2 pudieran llamar la atención en el sentido de que, si se comparan los casos A y D, B y E, y, C y F de los pavimentos JCP y JRCP con berma asfáltica,

resulta como conclusión que el valor de J aumenta con k. Una primera impresión llevaría a decir que este resultado es erróneo pues, lo lógico parecería lo contrario. En efecto, es absolutamente sensato esperar que J, un coeficiente llamado "de transferencia de carga", disminuya (es decir, mejore la transferencia) al reducirse los desplazamientos en torno a la junta, producto por ejemplo de una mejora en la capacidad de soporte del suelo.

Tan sensata es esta última explicación, que el mismo Vol. I del método de diseño AASHTO 93 señala que "*como guía general para el rango de valores de J, lo normal es que los valores más altos [menor transferencia de carga] estén asociados a pavimentos con bajos módulos de reacción de subrasante, altos coeficientes térmicos de hormigón, y grandes variaciones de temperatura*". Así, el volumen de diseño está contradiciendo su propia investigación base que aparece en el apéndice KK (Tabla KK7).

Pero, por otro lado, si se tiene en consideración la curva S que se forma en la relación $TC = f(AGG / k \ell)^*$, se llega a que el resultado de la Tabla 2 no está errado en el sentido recién mencionado. Debe tenerse muy en cuenta, eso sí, que aquí no se habla de J sino de TC, variables que debieran presentar, en todo caso, una estricta dependencia.

A este respecto, en una publicación exclusivamente dedicada a la trabazón mecánica como método de transferencia de carga, los autores Ioannides y Korovesis (9) citan lo siguiente: "*La LTE_s [transferencia de carga, TC] es extremadamente sensible y se deteriora rápidamente cuando la variable independiente ($AGG / k \ell$) cae en torno a 10. Es también interesante que, estando todo lo demás constante, un aumento en el módulo de reacción de la subrasante (k) o en la rigidez de la losa ($E h^3$) resulta en valores más bajos de LTE_s . Datos experimentales presentados por Teller y Cashell (10), así como también resultados numéricos presentados por Kilareski et al. y Ozbeki et al. (11,12) también concluyen lo mismo, aunque no se haya citado explícitamente de tal modo. Tal vez, esto ocurrió porque una conclusión de esta naturaleza habría aparentemente contradecido la especulación intuitiva que una base más firme o una losa rígida debieran mejorar la respuesta del pavimento. Sin embargo, a este respecto, una menor LTE_s no indica un peor sistema de pavimento, pues las deflexiones y tensiones se verán reducidas a medida que el k o Eh^3 aumentan. De este modo, la LTE_s baja se sustenta durante un período de tiempo mayor, llegando a índices de endurancia más altos, tal como lo reportaron Colley y Humphrey (13)*".

En resumen, los resultados de la Tabla 2 no debieran ser vistos sólo como valores de J, sino como valores de J que también tienen asociados valores de k, y otro conjunto de variables importantes cuya influencia en la transferencia de carga puede ser poco predecible. Lamentablemente, como no se otorgan mayores detalles del cómputo de J en el apéndice KK, no se pueden hacer más consideraciones en ese sentido.

* La TC está definida como la relación entre la deformación de la losa de alejamiento y aquella de la losa de aproximación, cuando una carga es colocada en la losa de aproximación justo en el borde de la junta.

Para calcular valores de J apropiados a la realidad nacional, lo más indicado será usar el método de cálculo propuesto por el método AASHTO y reproducido en la Ec. 12, pero utilizando las condiciones y características medias de los caminos de Chile que se deseen.

En este sentido, es muy posible que los valores que así se deriven cambien notablemente, pues las condiciones que se desean incluir pueden hacer cambiar fuertemente las tensiones. Por ejemplo, un pavimento con juntas reforzadas se alabea de un modo distinto a uno sin reforzamiento, alterando completamente la magnitud y ubicación de las tensiones máximas. Por otro lado, debieran incluirse gradientes térmicos zonales*, pues los observados en Chile en nada se asemejan a aquellos de la prueba AASHO, etc. Por último, tal como lo hizo la Task Force, los factores J computados debieran ser ajustados o revisados posteriormente de alguna manera por especialistas que conozcan los caminos locales.

No debe olvidarse que, en esencia, el parámetro J, más que una variable, resulta ser un coeficiente que altera la ecuación para que el método pueda emplearse también con otros tipos de pavimentos. En sí, el J no está definido claramente (14), o al menos esto nunca se ha explicado correctamente, y su tabla sólo pudo ser generada a partir de otros parámetros de diseño independientes. De esta manera, la metodología de cálculo empleada en Ec. 12 sólo serviría para tener una idea inicial de los valores en torno a los cuales oscilaría J, haciéndose indispensable el empleo de posteriores ajustes empíricos para lograr los valores locales de J para cada tipo de pavimento.

Todos aquellos sistemas con J mayor a 3.2 poseen peor transferencia de carga que los pavimentos con barras en las juntas (tipo prueba AASHO). Pero, debe notarse que 3.2 no sólo significa "juntas con barras", sino también clima, áridos, metodología constructiva, y otras tantas características influyentes en el comportamiento de la transferencia de carga y propias de la prueba AASHO. De ahí que AASHTO recomiende los ajustes locales.

Por último, se debe tener claro que J, independientemente de cómo se calcule, siempre tratará de evaluar la eficiencia de un sistema de transferencia de carga en un sistema de pavimento cualquiera con respecto a los de la prueba AASHO, pero en el sentido de la influencia que tiene esta eficiencia en el comportamiento del pavimento. En un caso extremo, esto significa que AASHTO debiera asignar Js iguales a dos sistemas de transferencia de carga efectivamente distintos si es que, estando absolutamente todo lo demás constante, ambos pavimentos resultan tener sistemáticamente igual comportamiento. (Lo anterior tiene su expresión conceptual en la Ec. 5).

* Al parecer, el apéndice KK calculó todas sus tensiones con un gradiente único y nulo.

3. DETERMINACIÓN DE UN MÉTODO PARA OBTENER EL FACTOR DE TRANSFERENCIA DE CARGA J EN CONDICIONES CHILENAS

En este capítulo se detallan tres metodologías (ecuaciones) para calcular el parámetro J. Son tres porque las dos primeras resultaron ser, de alguna manera, inconsistentes. Sin embargo, para mayor entendimiento de la complejidad de este problema se ha decidido incorporarlas aquí y detallar por qué debieron ser desechadas.

El hecho de no encontrar inmediatamente "la ecuación" que permita "despejar" J no significa haber fracasado en el trabajo de búsqueda. Además está decir que, dado el alto grado de ajuste subjetivo detectado en la guía AASHTO y todas las demás consideraciones descritas anteriormente, ni siquiera el método del apéndice KK puede ser considerado una definición.

El método a emplear debe cumplir con el requisito de ser consistente, lo que no significa solamente que los valores de J arrojados deban estar dentro de un rango, sino que la incidencia en el valor de J de todas las variables que están dentro de la forma de cálculo sea la correcta. En segundo término, debe permitir la incorporación de las variables transferencia de carga* y gradiente térmico, consideradas absolutamente fundamentales para medir la eficiencia de un sistema de transferencia de carga y para poder hacer consideraciones de tipo geográficas.

Una vez que se determine un método de esta naturaleza, se podrán calcular muchos Js, pero el valor que representará a cada pavimento en estudio se obtendrá sólo después de hacer una ponderación que considere la distribución promedio diario estacional de la TC, y también la distribución promedio diario anual del tránsito.

De esta forma cada pavimento estudiado tendrá un coeficiente de transferencia de carga. La tabla de recomendación de valores de J podrá ser generada considerando grupos de estos pavimentos, por ejemplo según geografía, minimizándose de este modo el error puro.

3.1 J A Partir de la Relación de Tensiones Dada por AASHTO (Apéndice KK)

De acuerdo con el método AASHTO, el factor J puede ser obtenido según lo descrito anteriormente, por medio de la Ec. 12. Las tensiones a cada lado de la Ec. 12 (lado AASHO y lado Chile) deben ser calculadas utilizando, en la mayor medida posible, las mismas condiciones. Por ejemplo, si a un lado se utiliza un gradiente térmico, al otro lado deberá utilizarse el mismo; pues la idea general es evaluar cómo se comporta la losa chilena en mismas condiciones c/r a la losa AASHO.

* Se refiere a la variable $TC = 100 S2/S1$ (%), donde S1 y S2 son las deformaciones de aproximación y alejamiento respectivamente, cuando hay una carga sobre la losa de aproximación inmediatamente próxima a la junta.

En este caso, las tensiones máximas fueron obtenidas utilizando el método de elementos finitos mediante el programa ILLISLAB (15).

Consideraciones para la Modelación Mediante Elementos Finitos:

- Carga a emplear: 1 eje simple de 18.000 libras (1 eje equivalente), por ser éste el patrón AASHTO, y además por ser el eje empleado en las mediciones de transferencia de carga (TC) en Chile.
- Posición de la carga con respecto a la junta: A seis pies de la junta, ya que esta es la distancia que produjo, en la mayoría de los casos, la tensión máxima en la prueba AASHO. Por razones de consistencia y dado que los resultados pueden ser extremadamente sensibles a esta variable, esta posición debió conservarse para las mediciones del caso chileno.
- Posición de la carga con respecto a la unión berma-losa: El Report 5 de la prueba AASHO (16) no entrega mayores antecedentes acerca de esta variable. Por lo tanto, se consideró apropiado una distancia típica, considerándose la misma que se empleó en el caso de las mediciones de TC en Chile, esto es, a 0.5 m del borde.
- Número de losas: Se consideraron sólo dos losas, ya que análisis preliminares indican que, para este tipo de estudios, un mayor número de losas sólo aumenta el costo computacional, sin aumentar mayormente la precisión. Esto coincide con recomendaciones dadas por A. Ioannides en (17).
- Dimensiones de las losas: $L = 4.5$ m (largo AASHO); $w = 3.65$ m (ancho AASHO); $h = 9$ y 10 pulgadas.
- Características del hormigón: $E = 4.2 \cdot 10^6$ psi, $\mu = 0.15$, $\alpha = 5.0 \cdot 10^{-6}$ F, $\gamma = 0.087$ lb/in³, por ser éstos valores típicos asimilables tanto a los hormigones de pavimento AASHO como a los chilenos.
- Neumático: Presión de inflado = 80 psi; impronta = 24.5 x 14.7 cm, la misma que se empleó en las mediciones de TC en Chile (18).
- Módulo de reacción de la subrasante: $k = 110$ psi. Se supone en ambos lados el mismo.
- Barras de las losas AASHO: Diámetro cercano a 1/8 del espesor de la losa, puestas en forma equiespaciada cada 12 pulgadas.
- Espesores de losa: 9 y 10 pulgadas.
- Malla: Respetando las restricciones recomendadas por A. Ioannides en "Analysis of Slabs-on-Grade for a Variety of Loading and Support Conditions" (19).

Consideraciones para el Uso de la Expresión de Spangler:

- Carga de esquina: $P = 9000$ lb
- $a_1 = 2^{0.5} \cdot 7.07$ in (AASHO).

Interpretación de los resultados:

El hecho de haber simulado un pavimento chileno con mismo módulo k, espesor h, y módulos E y μ del hormigón que el de la condición AASHO, permite simplificar mucho la Ec. 12. En efecto, de este modo los valores de la tensiones de Spangler son iguales para ambos casos y la expresión de J se simplifica a:

$$J = 3.2 \frac{\sigma_{\max \text{ Chile}}}{\sigma_{\max \text{ AASHO}}} \quad (13)$$

Estos autores piensan que mientras este caso no se comporte bien no es aconsejable probar con otros valores de k, u otros largos de losa.

Los resultados aparecen en Tabla 3:

Tabla 3 Parámetro J Calculado a Partir de la Tensión Máxima (k = 110 pci)

Valores de J a partir de Tensión Máxima con carga a 6 pies				
h [in]	ΔT [F]	Transferencia de carga		
		30%	60%	90%
9	-11	4.07	4.17	4.22
	0	3.18	3.23	3.25
	12	2.84	2.87	2.89
	24	2.64	2.67	2.68
10	-11	4.17	4.29	4.35
	0	3.14	3.20	3.23
	12	2.76	2.80	2.82
	24	2.55	2.58	2.60

Los problemas detectados en este análisis son básicamente dos. El primero guarda relación con la influencia que tiene la variable TC en las tensiones de los casos con trabazón mecánica. Aquí, según puede verse en un simple análisis de $(\sigma h^2 / P)$ en función de (L / ℓ) como el de la Figura 1, cambios significativos en el nivel de la variable $(AGG / k \ell)$ -que no es otra cosa que cambiar significativamente la variable TC (en la Figura 1, TC=30%, 60% y 90%)- no arrojan cambios importantes en las tensiones máximas, que siempre se encontraron por debajo de la carga

próxima al borde. En la Figura 1 esto queda de manifiesto al estar, para un mismo gradiente, las tres rectas (TC = 30%, 60% y 90%) prácticamente confundidas. Además, se observa un comportamiento distinto al esperado pues, el caso con TC = 90% resulta, en todos los gradientes analizados, con una tensión normalizada superior al caso 60% y éste a su vez superior al caso 30%.

La explicación al hecho que todas las rectas recién mencionadas estén acumuladas se debe, seguramente, al alto valor de L/ℓ , que al elevarse demasiado hace que la tensión máxima tienda al valor de la expresión de tensión máxima de Westergaard, sin importar demasiado el largo de la losa ni su tipo de sistema de transferencia de carga. Véase por ejemplo el caso $\Delta T = 0$, que resulta ideal para confirmar lo recién mencionado sin incluir los efectos de la temperatura. A valores menores de L/ℓ , es esperable que estas curvas se dispersen pero, siempre con las losas de TC altas con mayores tensiones máximas, debido a que mejorar la transferencia de carga es, para este efecto, acercarse más a la condición de losa infinita de Westergaard.

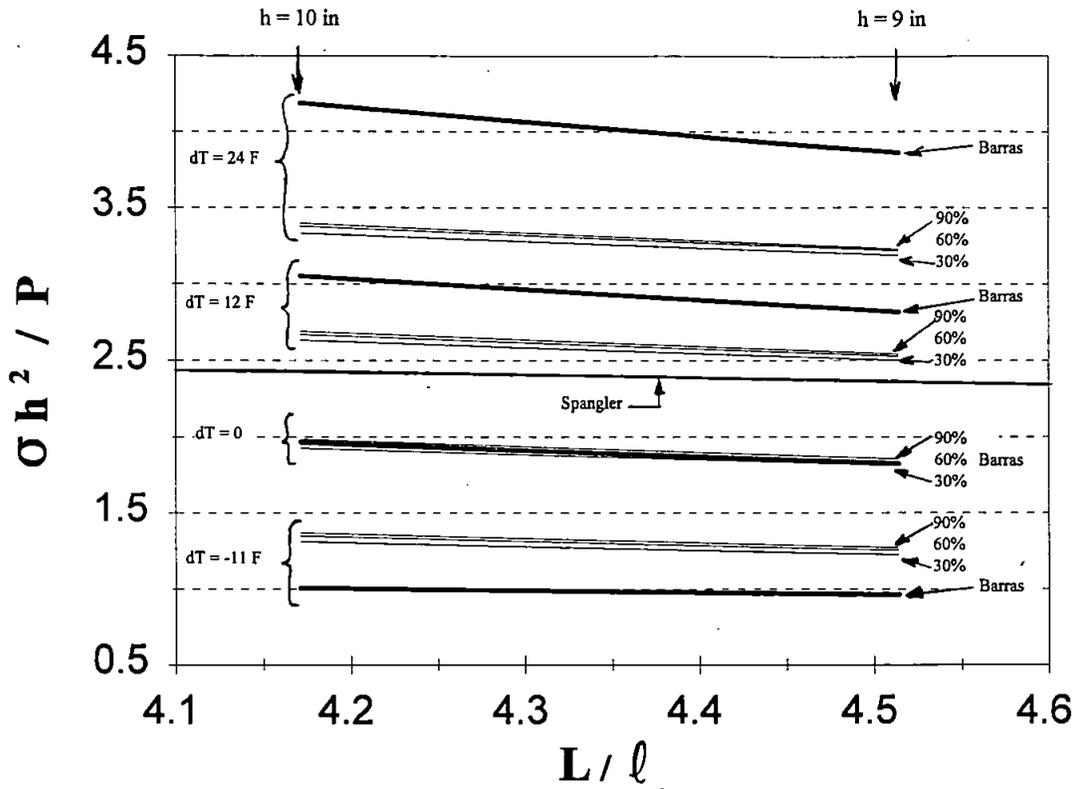


Figura 1 Variación de la Tensión Normalizada al Borde de la Losa

Como resultado de esta acumulación e inversión, los valores resultantes de J son inconsistentes: Por ejemplo con $\Delta T = 0$, se obtendría $J = 3.22$ para $TC = 90\%$, y $J = 3.18$ para $TC = 30\%$ (Tabla 3). Lo anterior no significa que los valores de las tensiones estén incorrectos. El programa, así como los casos analizados son absolutamente válidos; el error está en determinar de esta forma el J.

Como segundo problema, está el generado por el diferencial de temperatura. Se observa en la Figura 1 que, en términos relativos, el ΔT influye de distinto modo sobre el caso con barras que sobre el caso con trabazón. Para gradientes elevados (en valor absoluto), el valor de las tensiones del primero crece demasiado rápido si se le compara con el caso de la trabazón mecánica. De este modo se logran valores de J demasiado sensibles al gradiente térmico: $J = 2.6$ para $\Delta T = 24$ F, y $J = 3.2$ para $\Delta T = 0$.

Lo anterior tampoco se debe a resultados arbitrarios. La estimación combinada de tensiones se realiza analizando por separado aquellas producidas por las cargas y luego las debidas al alabeo por temperatura. El valor total o combinado no se logra de una superposición simple (pues se estaría asumiendo como supuesto el contacto total) así que debe realizarse un ajuste (R):

$$\sigma_{TOTAL} = \sigma_{CARGA} + R \sigma_{ALABEO} \quad (14)$$

A su vez, el valor de σ_{ALABEO} depende del diferencial de temperatura entre la fibra superior e inferior de la losa, ΔT ; del coeficiente de dilatación térmica del hormigón, α ; del módulo de elasticidad del hormigón, E; y del coeficiente adimensional C, que a su vez depende de la razón L/ℓ .

$$\sigma_{ALABEO} = \frac{C E \alpha \Delta T}{2} \quad (15)$$

En términos generales, al aumentar el valor de L/ℓ , el coeficiente C aumenta hasta llegar a un valor en que se vuelve prácticamente constante (C límite). Lamentablemente, la función de (L/ℓ) que rige el comportamiento de C no es la misma para el caso con barras que para el caso con trabazón mecánica. Lo anterior tiene su explicación en que los comportamientos de ambos alabeos son efectivamente muy distintos.

Por ejemplo, si se analiza un alabeo convexo (condición diurna), se verá que el pavimento con juntas sin proteger forma más o menos un "conjunto de convexidades", donde cada losa es una convexidad. Sin embargo, el pavimento que posee losas con juntas protegidas se alabeará más bien formando una única convexidad, comportándose como una cinta convexa, debido naturalmente a la restricción que imponen las barras.

Así, dado que las condiciones de apoyo de uno y otro caso son absolutamente distintas, es lógico que los valores de C sean distintos. Más aún, es lógico que el caso reforzado dé valores de σ_{ALABEO} superiores al del caso con trabazón y que esta diferencia se haga más notoria a mayores ΔT .

De lo anterior se concluye que esta metodología no resulta apropiada para la determinación del parámetro J .

3.2 Obtención de J a Partir de una Relación de Tensiones de Esquina

Dado que la posición de carga para condición de borde no proporciona resultados adecuados, se evaluó otra alternativa. Lo más evidente es considerar la carga en la esquina, posición que, si bien no interpreta la condición (posición de carga) que induce la tensión máxima, elimina algunas de las inconsistencias graves encontradas anteriormente.

Para el análisis de esta condición se consideró la carga a 0.5 m de la unión berma - losa, con uno de los bordes de la impronta sobre la junta transversal, de manera de analizar una posición media. Por otro lado, esta distancia es exactamente la misma que se empleó en las mediciones de TC en Chile, asegurándose consistencia entre los valores de TC que están disponibles y la metodología que se está empleando para determinar valores de J .

La ecuación para la obtención del parámetro J es la misma Ec. 12, con la diferencia que las tensiones máximas que se calculan por elementos finitos corresponden a la condición esquina y no a la de borde.

Durante el proceso y análisis de los resultados obtenidos, resulta importante mencionar que se detectó un problema de "inestabilidad" en las curvas de isotensión. En cada caso (casos AASHO y Chile con distintos TC, ΔT y espesores) la posición de la tensión máxima bajo esta condición de carga varía, además de variar considerablemente su orden de magnitud, lo que ocasiona inconsistencias en los valores de J .

El problema de la posición donde sería evaluada la carga máxima fue resuelto considerando, en todos los casos, una misma posición: La posición de tensión máxima para carga de esquina de Westergaard, que señala que la tensión máxima describe una curva de isotensión de radio X_1 desde la intersección de la esquina.

$$X_1 = 2 \sqrt{(a \sqrt{2}) \ell} \quad (16)$$

En la expresión, se supuso una carga de 9000 libras con una presión de 80 psi, lo que impuso el radio (a). El radio de rigidez relativa, ℓ , es el mismo definido en la Ec. 7, con todos las

constantes ya establecidas en capítulos anteriores. De este modo, todas las tensiones serían evaluadas en la junta a unas 40 pulgadas de la esquina. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4 Tensiones y Valores de J para la Condición de Esquina

Tensiones y Valores de J para la Condición de Esquina							
Código Caso	Transferencia de carga (input)	Gradiente Térmico dT [°F]	Espesor h [in]	Esfuerzo Principal de Tracción en Cara Superior			J a partir de Tensión de Esquina (40 in)
				(34 in)* [psi]	(40 in) [psi]	(55 in) [psi]	
C1F2H1	30%	-11	9	38.9	89.1	125.6	4.2
C2F2H1	60%	-11	9	42.6	91.2	125.1	4.3
C3F2H1	90%	-11	9	35.0	75.1	98.6	3.5
AAF2H1	1.25 a 12"	-11	9	31.0	68.6	89.0	3.200
C1F1H1	30%	0	9	18.2	64.4	91.2	5.6
C2F1H1	60%	0	9	22.1	66.3	90.1	5.8
C3F1H1	90%	0	9	14.5	50.1	63.4	4.4
AAF1H1	1.25 a 12"	0	9	4.5	36.8	45.8	3.200
C1F3H1	30%	12	9	0.0	36.3	49.3	113.8
C2F3H1	60%	12	9	1.3	38.4	48.7	120.2
C3F3H1	90%	12	9	0.0	22.3	22.3	69.9
AAF3H1	1.25 a 12"	12	9	0.0	1.0	0.0	3.200
C1F4H1	30%	24	9	0.0	17.3	19.8	ERR
C2F4H1	60%	24	9	0.0	19.7	19.7	ERR
C3F4H1	90%	24	9	0.0	3.8	0.0	ERR
AAF4H1	1.25 a 12"	24	9	0.0	0.0	0.0	3.200

Los valores de J que resultan son muy sensibles a las variaciones de ΔT y TC, siendo en muchos casos absolutamente irreales. Además, queda de manifiesto en forma evidente que es muy difícil la comparación directa de tensiones de losa tipo trabazón mecánica con las que poseen juntas con barras.

* Los números entre paréntesis indican la distancia desde el borde de la losa al punto de análisis en la junta transversal.

En forma adicional se destaca lo siguiente:

-El J no disminuye claramente con los aumentos de TC sino hasta superar valores de 60%, límite antes del cual su comportamiento no sería claro.

- El J sólo podría ser calculado para gradientes nulos y negativos, pues con valores positivos diverge rápidamente (a este respecto se decidió incluir en la tabla tensiones de los nodos vecinos a modo de demostrar que esto no se debe a una mera mala elección de punto de evaluación). Esto queda de manifiesto en las celdas que aparecen con ERR.

- El J no sigue un comportamiento adecuado con el aumento del gradiente. Según los resultados aquí mostrados, el J aumenta (empeora la TC) cuando aumenta el ΔT .

Como consecuencia de lo anterior, la aplicación de esta metodología no es adecuada para la estimación de J.

3.3 Búsqueda de una Solución Alternativa

Los resultados anteriores permiten establecer que el hecho de comparar pavimentos con distintos mecanismos de transferencia de carga (barras y trabazón mecánica) involucra comparar comportamientos y órdenes de magnitud distintos en las tensiones máximas. Lo anterior deriva en comportamientos indeseados con respecto a la TC y ΔT , y en valores de J que se alejan completamente de la realidad.

3.3.1 Solución Alternativa por Tensiones

Para enfrentar el problema de la comparación de pavimentos de distinto tipo, se decidió cambiar el pavimento con barras de traspaso de carga en las juntas (AASHO), por otro equivalente pero con trabazón mecánica, que fuera fácilmente ocupado como patrón de comparación para los pavimentos chilenos. La equivalencia buscada es sólo en términos de J. Es decir, el J de este pavimento equivalente debe ser por definición, 3.2.

La búsqueda de cada equivalente a los casos AASHO previamente analizados, por ejemplo casos AAF1H1, AAF2H1, AAF3H1 y AAF4H1 de la Tabla 3, se basó en relacionar el J con la transferencia de carga (TC). Como punto de partida, se asumió que el J promedio de todos los pavimentos de la prueba AASHO es, por definición, 3.2; por lo tanto, se buscó qué TC le correspondiera en promedio a todos esos casos, es decir se busca la TC_{AASHO} .

Lo anterior se logra analizando por separado todos y cada uno de los pavimentos que consideró la prueba AASHO. Éstos son ocho, con espesores que fluctúan entre 2.0 a 12.5", todos con barras equiespaciadas a 12" de espesores cercanos a 1/8 del espesor de la losa. Para el análisis

computacional se utilizó el programa de elementos finitos ILLISLAB. Cada pavimento fue sometido a la carga de un eje de 18000 libras en las condiciones requeridas para el cálculo de la TC. De este modo, para cada pavimento de la prueba AASHO se calculó computacionalmente la TC.

Es importante señalar aquí que la TC fue evaluada respetando la posición de carga, magnitud y tipo de carga (carga de 18000 libras, separación de eje de 1.78 m, tamaño de la impronta de las ruedas, etc.), y punto de evaluación de la TC (a 50 cm) que se empleó en las campañas de medición que forman la base de datos de 21 pavimentos de hormigón chilenos, con los que posteriormente se intentará imponer las condiciones nacionales. De este modo, se asegura cierta consistencia para los trabajos posteriores que se basen en estos resultados.

El resultado de esta evaluación de los pavimentos AASHO aparece en la Tabla 5.

Tabla 5 Transferencia de Carga para Pavimentos de la Prueba AASHO

Transferencia de Carga a 50 cm de la Berma Calculada a Partir de Elementos Finitos				
Código Caso	BARRAS	Gradiente Térmico	h	TC
		[in]	[in]	a 50 cm
AAF1HA	0.375 a 12"	0	2.5	65.2 %
AAF1HB	0.500 a 12"	0	3.5	72.0 %
AAF1HC	0.625 a 12"	0	5.0	79.7 %
AAF1HD	0.875 a 12"	0	6.5	81.3 %
AAF1HE	1.000 a 12"	0	8.0	84.6 %
AAF1HF	1.250 a 12"	0	9.5	85.3 %
AAF1HG	1.375 a 12"	0	11.0	87.3 %
AAF1HH	1.625 a 12"	0	12.5	87.8 %
			Media	80.4 %
			Desv. Std.	7.5 %

No se consideró importante repetir el análisis de la tabla anterior frente a distintos valores de gradiente térmico. Después de todo, no es de esperar que el caso con barras varíe mucho en función de ΔT . Por otro lado, el valor de TC promedio obtenido es precisamente lo que se supone de TC para dicha prueba en diversos estudios (20). El comportamiento, así como la desviación encontrados son adecuados.

Todo lo anterior sólo permite afirmar que, en promedio, la TC observada en la prueba AASHO sería de 80.4%, en el punto y en las condiciones en que se está evaluando.

Es decir, a $J=3.2$ le corresponde una transferencia de carga $TC = 80.4\%$. Luego, se debe reemplazar el caso AASHO (y sus cuatro condiciones de evaluación AAF1H1, AAF2H1, AAF3H1 y AAF4H1 indicadas en la Tabla 4), por otro caso, en las mismas cuatro condiciones, en que la transferencia de carga en la junta se obtenga sólo a través de la trabazón mecánica. En otras palabras, el procedimiento propuesto equivale a eliminar las barras de dichos casos y reemplazarlas por trabazón mecánica con $TC = 80.4\%$.

Por motivos propios a la manera cómo se deforma el perfil transversal cuando éste está sometido a una carga, la TC definida como razón de deformaciones entre losas no es la misma cuando se la evalúa en distintas posiciones de la junta transversal. De ahí la importancia de generar la Tabla 5 con una TC evaluada en el mismo lugar de la JT donde se midió en las campañas de medición de terreno de pavimentos en servicio. De este modo, también, al ingresar como dato de entrada $TC = 60\%$ en un programa como ILLISLAB, la relación de deformaciones de losas varía en torno a 60%, dependiendo del punto de la junta donde se la evalúe.

En este estudio, lo que se busca son casos de pavimentos con trabazón mecánica en que la TC, medida a 50 cm de la unión berma-losa, dé 80.4%. (Esto es así porque así fue generada la Tabla 4 y así se midió en las campañas de terreno). Además, deben respetarse también todos los otros datos de la aplicación de la carga.

Los resultados encontrados aparecen en la Tabla 6, junto con los mismos casos de trabazón mecánica mostrados anteriormente.

Tabla 6 Comparación de Tensiones Casos Chilenos y AASHTO Equivalente (sin barras)

Comparación de Tensiones Casos Chilenos y AASHTO Equivalente (sin barras)							
Código Caso	Transferencia de Carga (input Progr.)	Gradiente Térmico dT [°F]	Espesor h [in]	Esfuerzo Principal de Tracción en Cara Superior			Transferencia de Carga a 50 cm
				(34 in) [psi]	(40 in) [psi]	(55 in) [psi]	
C1F2H1	30%	-11	9	38.875	89.144	125.627	38%
C2F2H1	60%	-11	9	42.608	91.246	125.137	72%
C3F2H1	90%	-11	9	34.993	75.058	98.629	96%
CAF2H1	75%	-11	9	41.089	88.041	120.141	83%
C1F1H1	30%	0	9	18.234	64.408	91.188	34%
C2F1H1	60%	0	9	22.082	66.307	90.146	70%
C3F1H1	90%	0	9	14.527	50.055	63.436	95%
CAF1H1	75%	0	9	20.597	63.064	85.035	82%
C1F3H1	30%	12	9	0.000	36.338	49.291	34%
C2F3H1	60%	12	9	1.312	38.378	48.711	70%
C3F3H1	90%	12	9	0.000	22.310	22.310	95%
CAF3H1	75%	12	9	0.000	35.209	43.754	82%
C1F4H1	30%	24	9	0.000	17.321	19.758	36%
C2F4H1	60%	24	9	0.000	19.674	19.675	71%
C3F4H1	90%	24	9	0.000	3.770	0.000	95%
CAF4H1	75%	24	9	0.000	16.582	14.844	83%

Con los nuevos casos (CAFxHx) los valores de las tensiones son más propicios para el cálculo de J a partir de tensiones. Sin embargo, sigue existiendo el problema de que la tensión máxima varía sensiblemente su posición y valor de acuerdo a la condición térmica evaluada. Por ejemplo, en el caso de gradiente 24 F con una TC de 90%, resulta difícil generar un valor de J debido a las muy bajas tensiones observadas; en todo caso, este sería el extraordinario valor $J = 3.2 \times 3.770 / 16.582 = 0.728$.

Como conclusión se refuerza nuevamente la idea que calcular el J de manera tensional es muy difícil, especialmente cuando se incorporan variables como nivel de transferencia de carga y gradiente térmico; esto último aunque se reduzca el caso AASHO a un caso sin barras.

Debe buscarse una comparación distinta a la tensional, pero que de todos modos sirva correctamente para evaluar la eficiencia de la transferencia de carga. En este sentido, se intentó con una nueva comparación (ecuación) que cambia las tensiones máximas por la deformación de la losa en la proximidad de la junta, cuando es aplicada la carga. Esto último se basa en que este indicador está también directamente relacionado con la TC.

La citada comparación no podría ser aplicada directamente entre pavimentos con barras y con trabazón mecánica, ya que en el caso con barras las deformaciones son muy pequeñas, lo que generaría comportamientos indeseados. El problema puede ser solucionado usando como patrón las deformaciones del caso AASHO equivalente, sin barras.

3.3.2 Solución Alternativa por Deformaciones

De acuerdo a las conclusiones obtenidas anteriormente, se propone un método alternativo basado en las deflexiones:

$$\frac{\delta_{Eq\ AASHO}}{\sigma_{Sp\ AASHO}} = \frac{\delta_{Chile}}{\frac{J}{3.2} \times \sigma_{Sp\ Chile}} \quad (17)$$

Donde δ representa las deformaciones en la losa de aproximación, en las cercanías de la junta, a 50 cm de la berma, que se producen al ser colocado un eje de 18 kips en la misma posición definida anteriormente. El resto de las variables son las mismas que se definieron en metodologías anteriores.

En este caso, dada la información de casos anteriores, se aplicó un pequeño ajuste lineal para acercarse más a la condición de TC = 80.4%, ya que en los casos anteriores se supuso suficiente llegar a 82 u 83% y no 80.4%, precisamente.

Los resultados obtenidos según este procedimiento aparecen en la Tabla 7:

Tabla 7. Cálculo de J a Partir de Deformaciones

Cálculo de J a Partir de Deformaciones					
Código Caso	Gradiente Térmico	Espesor	Deformación al aplicar la Carga	TC	J a Partir de Deformaciones
	dT	h		100*S2/S1	
	[°F]	[in]	[in]		
C1F2H1	-11	9	0.037944	38%	4.20
C2F2H1	-11	9	0.030370	72%	3.36
C3F2H1	-11	9	0.026646	96%	2.94
CAF2H1	-11	9	0.028405	83%	3.14
(Ajuste)			0.028921	80.4%	3.200
C1F1H1	0	9	0.036151	34%	4.29
C2F1H1	0	9	0.028606	70%	3.39
C3F1H1	0	9	0.024905	95%	2.95
CAF1H1	0	9	0.026652	82%	3.16
(Ajuste)			0.026972	80.4%	3.200
C1F3H1	12	9	0.035760	34%	4.31
C2F3H1	12	9	0.028225	70%	3.40
C3F3H1	12	9	0.024509	95%	2.96
CAF3H1	12	9	0.026264	82%	3.17
(Ajuste)			0.026539	80.4%	3.200
C1F4H1	24	9	0.037231	36%	4.23
C2F4H1	24	9	0.029684	71%	3.37
C3F4H1	24	9	0.025981	95%	2.95
CAF4H1	24	9	0.027728	83%	3.15
(Ajuste)			0.028162	80.4%	3.200

El comportamiento de los valores de J está dentro de lo esperado en lo que se refiere a su relación con la TC. Valores de TC bajas, por ejemplo 35% y menos deben tener J = 4.3 o más. Los pavimentos cuya TC alcance niveles muy altos (TC superiores o iguales a 80.4% deben tener J inferiores o iguales a 3.2).

La tabla anterior no permite visualizar diferencias significativas de J entre casos con distintos gradientes. Esto proviene de imponer que $J = 3.2$ significa $TC=80.4\%$ para cualquier temperatura. Pero, de calcularse el promedio de TC de los ocho casos AASHO con barras para otros gradientes distintos, el resultado variaría muy poco debido a que la TC de un pavimento con barras está básicamente definida por las barras y no por su gradiente. Por lo tanto se considerará que el efecto del gradiente está debidamente incluido.

El proceso empleado aquí es uno -tal vez de muchos- cuya gran ventaja es asegurar la consistencia en lo que se refiere a la transferencia de carga al hacer la comparación. Sin embargo, no debe olvidarse que todos los resultados obtenidos son producto de evaluaciones con un programa de elementos finitos, y deben de todas formas ser calibrados empíricamente de alguna manera.

Los resultados obtenidos para J en función de la transferencia de carga quedan representados gráficamente en la Figura 2. A este respecto, resulta importante destacar que en la guía AASHTO, en la página III 120, sección correspondiente a recapados (21) se cita lo siguiente: "Para pavimentos JPCP y JRCP, determine el coeficiente de transferencia de carga J empleando las siguientes sugerencias": [Tabla 8].

Tabla 8 Relación Recomendada por AASHTO para la Determinación de J en Pavimentos JPCP y JRCP

Porcentaje de Transferencia de Carga	J
> 70	3.2
50 - 70	3.5
< 50	4.0

De este modo, la curva representada en la Figura 2 tiene un respaldo que permite asegurar un adecuado nivel de precisión. Destaca que la relación determinada en este estudio es aún más conservadora que la que aparece en la Tabla 8, pudiendo deberse esto último a diferencias en la posición del punto de evaluación.

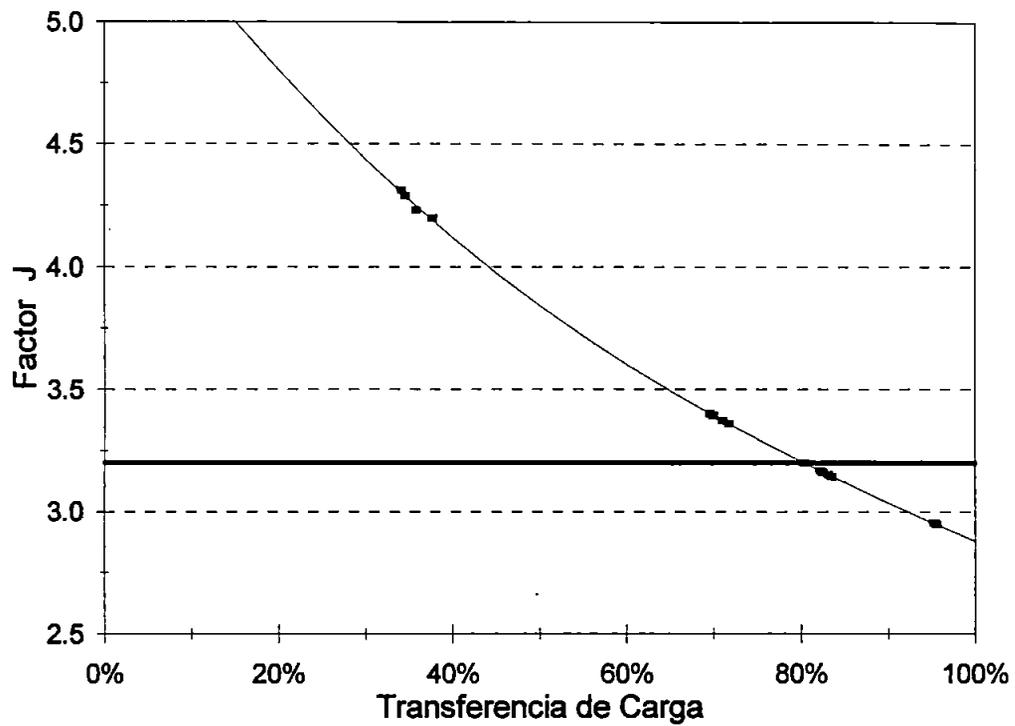


Figura 2 Relación J - Transferencia de Carga Calculada a partir de Deformaciones

4 VALIDACIÓN DE LA BASE DE DATOS EXISTENTE

4.1 La Base Datos Existente

Hacia fines de la década del 70, se inició un extenso programa de reconstrucción de los tramos más deteriorados de la ruta longitudinal y otros caminos de primera importancia chilenos. Por ello, y dada la magnitud de las inversiones, la Dirección de Vialidad inició en 1984 un proyecto para controlar y monitorear el comportamiento de pavimentos asfálticos y de hormigón. El estudio incluyó el análisis de 21 pavimentaciones de hormigón y 18 de asfalto.

El objetivo principal del proyecto fue desarrollar modelos de predicción de comportamiento que sirviesen de base a un sistema de evaluación económica, que a su vez operaría en un programa mayor orientado a la gestión integral de pavimentos. Un segundo objetivo fue el desarrollo de un programa de rehabilitación, orientado a la mantención de rutina y a rehabilitaciones mayores, que pudiera ser aplicado en pavimentos en servicio.

El análisis de los 21 pavimentos de hormigón fue llevado a cabo mediante convenios entre la Dirección de Vialidad y el Instituto de Investigaciones y Ensayes de Materiales, IDIEM, dependiente de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile. En la Figura 3 se ha graficado un mapa esquemático de su ubicación y en la Tabla 9 se ha dispuesto un resumen de sus características.

Para el estudio de estas 21 pavimentaciones, se realizaron múltiples mediciones y registros que son aún actualizados regularmente. En lo que se refiere a transferencia de carga, se cuenta con una base de datos que incluye información de deflexiones en varios puntos claves de una losa (entre ellas, las deflexiones en los mismos puntos usados en el capítulo anterior para los cálculos de TC), cuando ésta es sometida a la carga de un eje equivalente (de la misma forma usada computacionalmente en el capítulo anterior). La información antes citada fue tomada en terreno mediante bases de referencia profunda (BRP) ubicadas a 3 m de profundidad, durante los primeros años de vida del pavimento, en distintas temporadas y a distintas horas del día, cubriendo muchas veces ciclos que superaron las 24 hrs (22).

Lamentablemente, sólo se cuenta con información de este tipo para 18 de los 21 pavimentos del seguimiento, pero, por su tamaño y por todos los aspectos que incorpora la base de datos, puede ser considerada como una excelente fuente para evaluar la transferencia de carga de pavimentos chilenos.

Una posible limitación la constituye el hecho que las mediciones provienen, para cada pavimento estudiado, de una junta escogida como la junta con mayor abertura de un total de diez consecutivas. Por ello, podría ser que la junta instrumentada tuviese sistemáticamente una menor transferencia de carga por haber partido con una abertura inicial de construcción mayor al promedio. Pero, por otro lado, como las mediciones provienen sólo del primer tercio de vida de los caminos,

podría esperarse también que la base de datos muestre TCs altas debido al escaso desgaste por fricción, debido al poco tránsito.

En síntesis, para usar correctamente la base de datos disponible deberán asegurarse los siguientes puntos:

- 1.- El empleo de información proveniente de sólo una junta por contrato testigo deberá ser, en promedio, representativa de todo el resto del contrato. Es decir, los valores a emplear deben ser -en promedio- buenos indicadores de lo que ocurre con la TC media de los contratos.
- 2.- El empleo de la TC de la junta instrumentada durante sus primeros años de vida deberá ser representativo de toda la vida útil del pavimento. Es decir, los valores a emplear deben ser consistentes con lo que en realidad ocurre con la TC media en tiempo.

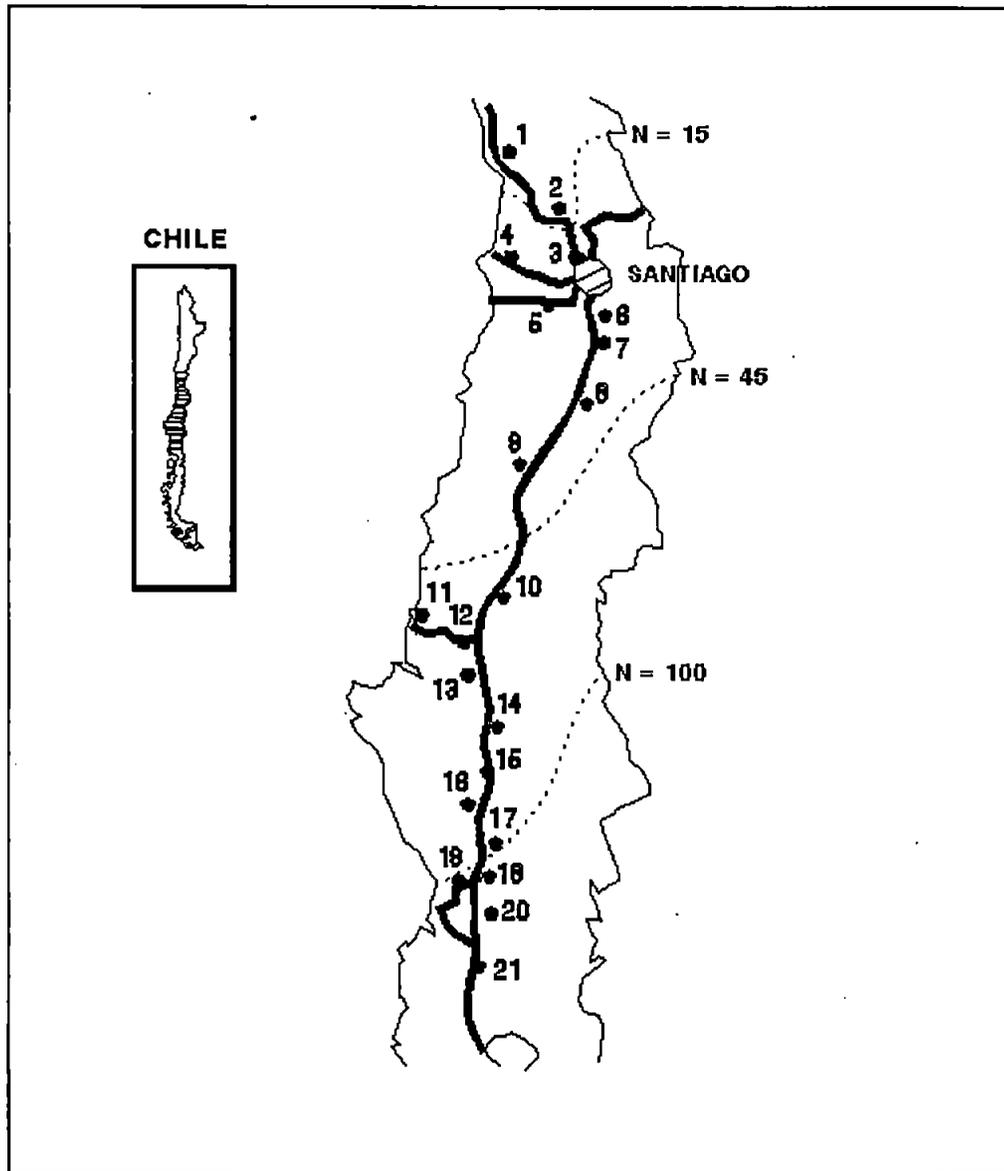


Figura 3 Mapa Esquemático de las Zonas Testigo
(Las líneas punteadas indican número de días con nivel de precipitaciones superior a 5 mm)

4.2 La TC en la Junta Instrumentada como Estimador de la TC Media

Para estos efectos, conviene recordar que la junta instrumentada fue definida como la junta más abierta de un total de diez juntas consecutivas, pretendiéndose con esto estudiar el caso más desfavorable. Además, en ese momento el programa de Seguimiento de Pavimentos encontró que la abertura de junta parecía seguir un comportamiento cíclico, observándose que cada cerca de seis losas se presentaba una abertura superior al promedio del resto.

De este modo, es posible que la junta de la cual se está obteniendo la información, es decir la instrumentada, entregue valores de TC más bajos que el promedio. Para verificar esta suposición debe observarse el comportamiento de la TC con respecto al resto de las juntas.

Para tal efecto, se midió con Deflectómetro de Impactos o Falling Weight Defletometer (FWD) la transferencia de carga en diez juntas contiguas a la junta instrumentada. Dado que la transferencia de carga depende fuertemente de la temperatura y por tanto evoluciona a través del día, estas mediciones con FWD debieron ser realizadas cíclicamente, obteniéndose curvas de evolución de la TC en el día (Figuras 4 a 10). Por ejemplo, en la Figura 4 las curvas finas representan cómo evolucionó la TC el día 25 de mayo de 1996, en las 10 juntas (5 anteriores y 5 posteriores) contiguas a la losa instrumentada, en la zona testigo de Longotoma. Por su parte, la curva destacada representa la transferencia de carga en la junta instrumentada y la gruesa, el promedio de las 11 juntas; siendo este último valor el mejor estimador del valor real de TC en esa zona testigo, aquel día.

Así, para evaluar si una medición de TC en la junta instrumentada es representativa del valor real de la TC, lo más razonable es comparar las curvas de la junta instrumentada (destacada) y la de la media (gruesa).

Una simple inspección visual de la evolución de la TC en los días en que la medición fue realizada lleva a concluir lo siguiente:

- En dos casos, Paine y Graneros, la dispersión es mínima y las curvas de la media y de la instrumentada prácticamente se cofunden. Cabe notar que, además, los comportamientos generales de ambas son similares.
- En un caso, Longotoma, la media y la instrumentada se entrelazan obteniéndose un resultado final de un error aceptable; ya que una parte del día la media sería subevaluada y otra sobrevaluada.
- En Lampa y Talagante, la junta instrumentada prediría bien la media de la TC sólo en las primeras hora de la mañana, quedando el resto del día en valores tal vez demasiado bajos.
- En Lo Vásquez, la media estaría subevaluada durante todo el día.
- En San Fernando, la media estaría sobrevaluada durante todo el día.

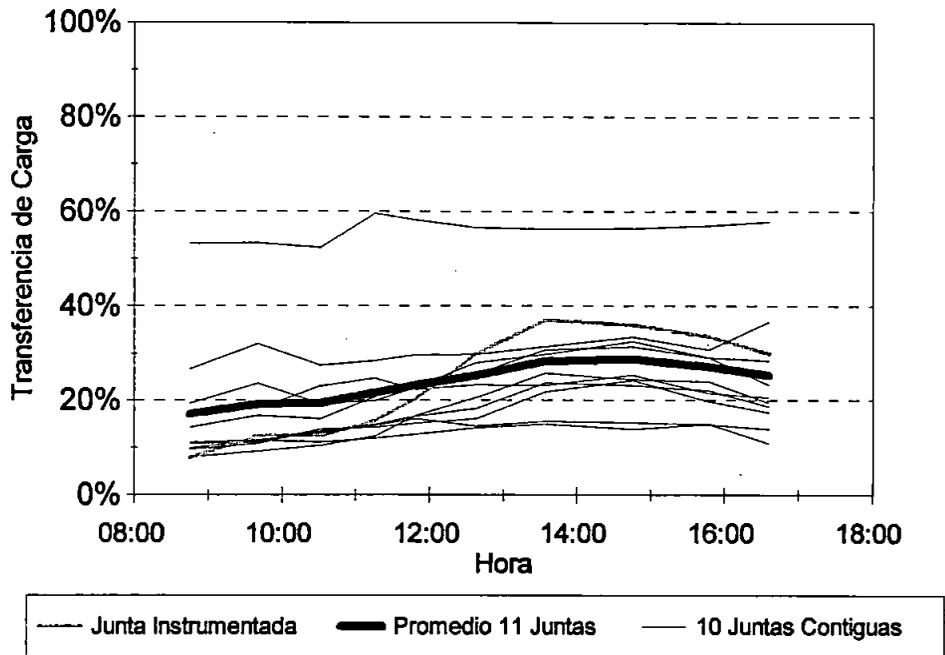


Figura 4 Evolución Diaria de la Transferencia de Carga medida con FWD
Zona Testigo 1, Longotoma Fecha: 25 Mayo 1996

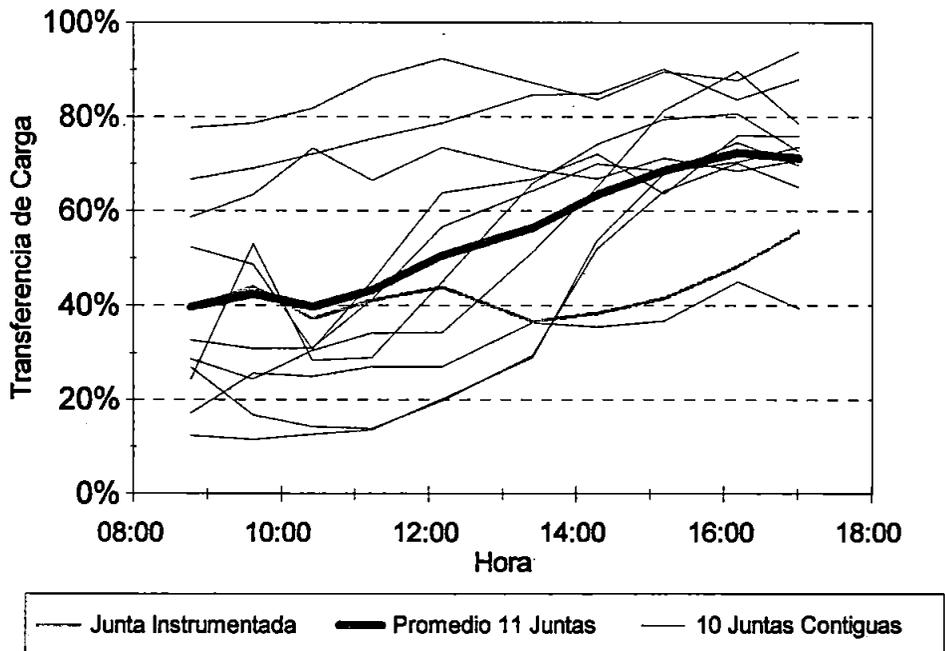


Figura 5 Evolución Diaria de la Transferencia de Carga medida con FWD
Zona Testigo 3, Lampa Fecha: 28 Mayo 1996

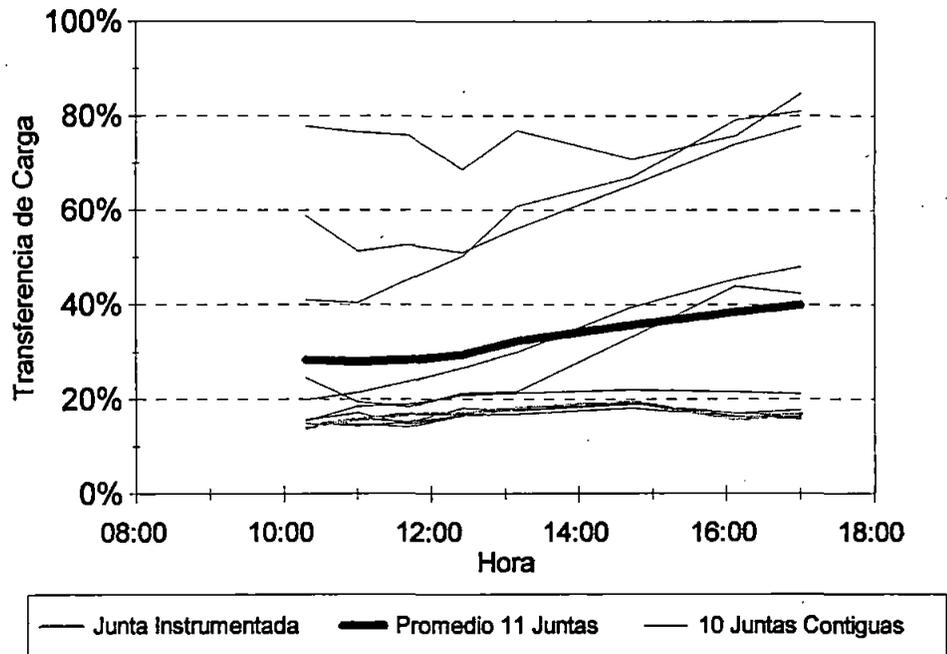


Figura 6 Evolución Diaria de la Transferencia de Carga medida con FWD
Zona Testigo 4, Lo Vásquez Fecha: 14 Mayo 1996

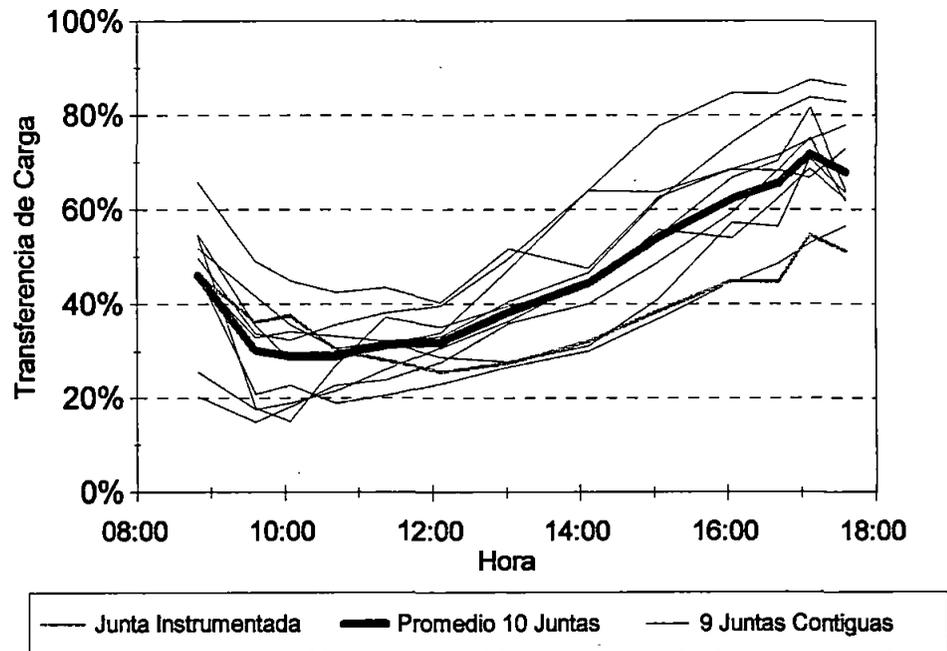
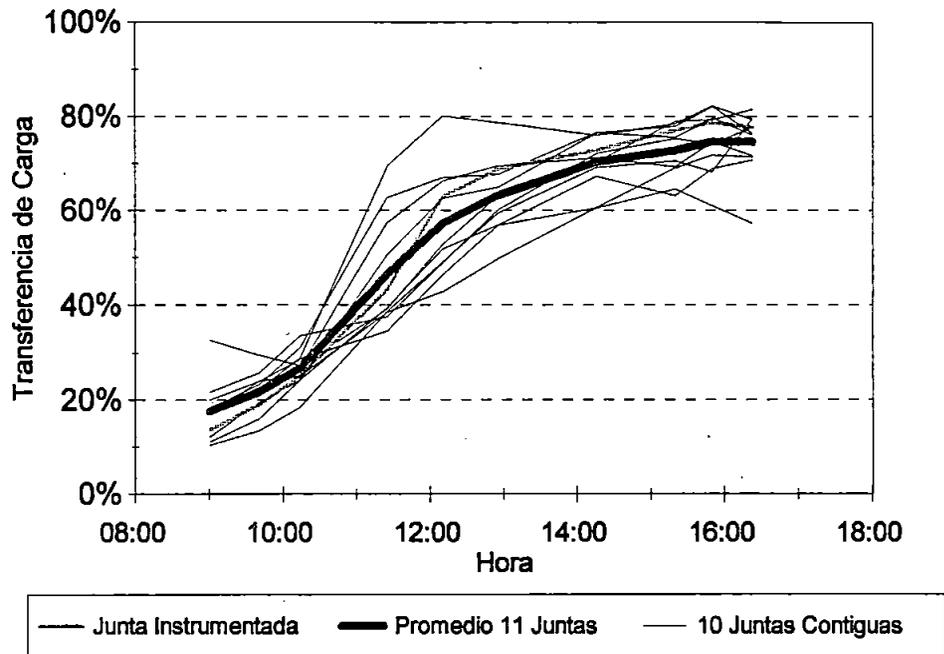
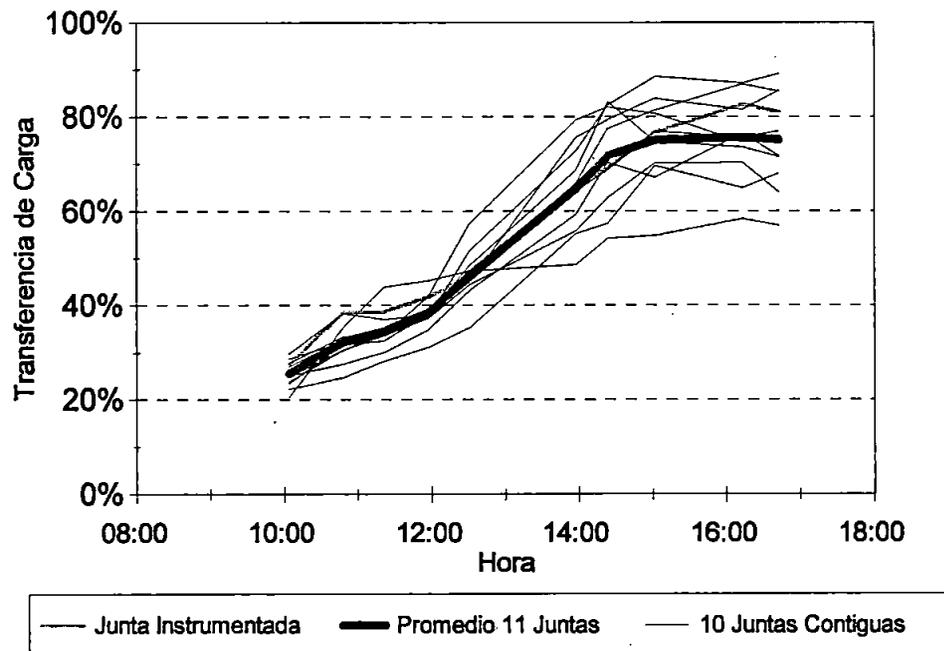


Figura 7 Evolución Diaria de la Transferencia de Carga medida con FWD
Zona Testigo 5, Talagante Fecha: 10 Mayo 1996



**Figura 8 Evolución Diaria de la Transferencia de Carga medida con FWD
Zona Testigo 6, Paine Fecha: 31 Mayo 1996**



**Figura 9 Evolución Diaria de la Transferencia de Carga medida con FWD
Zona Testigo 7, Graneros Fecha: 30 Mayo 1996**

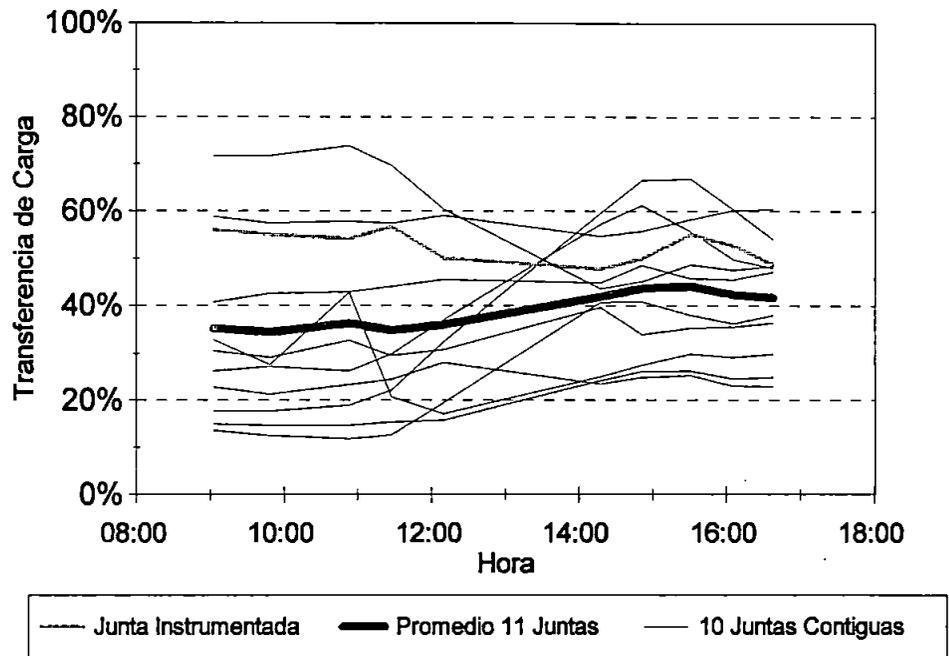


Figura 10 Evolución Diaria de la Transferencia de Carga medida con FWD
Zona Testigo 8, San Fernando Fecha: 29 Mayo 1996

De lo anterior no se puede concluir nada en forma definitiva. Por tal motivo, se llevó a cabo un análisis estadístico de cada una de las zonas testigo y además un análisis global de toda la información en conjunto, es decir, para cada hora, en todas las zonas testigo estudiadas. Se comparó la diferencia del valor medio de la TC en las 11 juntas a esa hora, con el valor de la TC en la junta instrumentada, a esa hora*.

La prueba estadística realizada se basa en que si el valor real de la transferencia de carga, a su vez bien representado por la media de 11 juntas, TCM, puede ser predicho por la transferencia de carga en la junta instrumentada, TCI, entonces, la diferencia $X = TCI - TCM$ sigue una distribución normal de media cero. Al mismo tiempo, mientras menor sea la dispersión de la función así generada, menor será el error esperado para el estimador TCI.

La prueba a utilizar se basa en el teorema que establece que, si una variable X (una diferencia) sigue una distribución normal de media μ y varianza σ^2 desconocidas**, entonces, la muestra $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ (la campaña de mediciones realizadas con FWD) sigue también una distribución normal, y además se satisface que la variable definida en la Ec. 18 sigue una distribución t de Student con $n-1$ grados de libertad.

$$T = \frac{\bar{X} - \mu}{S / \sqrt{n}} \quad (18)$$

Donde X es la media y S es un estimador de la desviación estándar de la población definido como:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}} \quad (19)$$

Así, se puede asegurar que

$$P \left(-t_{\alpha/2, n-1} < T = \frac{\bar{X} - \mu}{S / \sqrt{n}} < t_{\alpha/2, n-1} \right) = 1 - \alpha \quad (20)$$

Como resultado, para la hipótesis bilateral:

* Este análisis estadístico global tiene validez ya que la metodología empleada para determinar J no parte de la determinación de un valor de TC único (promedio) para cada zona testigo, sino que de una distribución diaria estacional de TC que a su vez determina una distribución diaria estacional de J , a ser ponderado posteriormente según una distribución diaria de EE acumulados.

** Inicialmente la media y la varianza son desconocidas. La prueba estadística permitirá determinar sus posibles valores, o la validez de determinadas hipótesis.

$$\begin{aligned} H_0 &: \mu = \mu_0 \\ H_1 &: \mu \neq \mu_0 \end{aligned}$$

el rechazo de H_0 en un nivel de significancia α resulta cuando el estadístico t , calculado como

$$t = \frac{\bar{x} - \mu_0}{S / \sqrt{n}} \quad (21)$$

excede a $t_{\alpha/2, n-1}$ o es menor a $-t_{\alpha/2, n-1}$, según lo confirma la Ec. 20.

En síntesis, se calculará el estadístico t definido en la Ec. 21 para la muestra de la variable aleatoria X , y se comparará su valor absoluto con $t_{\alpha/2, n-1}$, a fin de verificar la aprobación o rechazo de $H_0: \mu = 0$, dado un determinado nivel de significancia α .

Antes de presentar los resultados, debe quedar claro que *"la aceptación de una hipótesis implica tan sólo que los datos no proporcionan evidencia suficiente para refutarla. Por otro lado, el rechazo implica que la evidencia de la muestra la refuta. Puesto de otra manera, el rechazo significa que hay una pequeña probabilidad de obtener la información muestral observada cuando, de hecho, la hipótesis es verdadera"* (23).

Tabla 10 Resultados del Test T al Analizar la Variable X = TCI - TCM

Zona Testigo	Núm. de Obs. en el día, en cada junta	X = TCI - TCM		Valor t de la Muestra	t crítico ($\alpha = 5\%$)	¿Predice bien la media?	Tipo de error
		Media (%)	σ (%)				
Longotoma	10	0.05	6.6	0.023	2.262	SI	OK
Lampa	10	-12.12	10.7	-3.388	2.262	NO	Subevalúa
Lo Vásquez	8	-15.74	4.3	-9.662	2.365	NO	Subevalúa
Talagante	13	-8.03	9.5	-2.941	2.179	NO	Subevalúa
Paine	10	1.41	3.6	1.170	2.262	SI	OK
Graneros	10	2.83	2.9	2.902	2.262	NO	Sobreevalúa
San Fernando	10	13.67	6.0	6.797	2.262	NO	Sobreevalúa
Total	71	-2.42	11.5	-1.769	1.994	SI	OK

La media de X indica qué tan alejado está el predictor del valor real, mientras que su dispersión indica si la "forma" de ambas curvas (TCI, TCM) es parecida. Así, en casos como Lo Vásquez, las curvas son parecidas pero existiría una diferencia sistemática (media elevada con baja dispersión), mientras que en otros casos como Longotoma no existe diferencia sistemática pero las curvas no son tan "parecidas" (baja media esta vez con dispersión más elevada).

En el conjunto global, X se comporta con media muy cercana a cero: -2.42%. Esto significa que es de esperarse que el error sistemático sea de ese orden, lo que resulta aceptable. Por otra parte, la desviación de 11% da cuenta de la aleatoriedad esperada en el error, asumiéndose que este valor es absolutamente aceptable para estudios de esta naturaleza. De este modo, el valor medio (esperado) para el error TCI-TCM es:

$$\delta (TCI-TCM) = -2.42\% \pm 11.45\% \quad (22)$$

Para saber si en definitiva pueden estos resultados ser considerados satisfactorios, se realizó el test de hipótesis con $H_0: \mu = 0$ para el grupo de las siete zonas testigo estudiadas (ennegrecido en la Tabla 10). Los resultados indicaron que, en términos globales, de acuerdo a mediciones efectuadas en 1996 por medio de FWD, con un nivel de significancia de $\alpha = 5\%$, la transferencia de carga medida en la junta instrumentada puede ser considerada, en promedio, un predictor del valor medio de la transferencia de carga.

Convendría destacar, eso sí, que el t de la muestra total es apenas superior al valor de $-|t \text{ crítico}|$, lo que estaría indicando que la condición estaría cerca de no cumplirse. De ser así, el rechazo ocurriría por subevaluación de TCM por parte de TCI. Esto significaría que la TC de la junta instrumentada sería, con un nivel de significancia de $\alpha = 5\%$, menor que la transferencia de carga promedio. Lo anterior sería absolutamente lógico si se considera que la junta instrumentada fue definida como la junta con mayor abertura.

Una revisión caso a caso de la misma hipótesis indica que, como era de esperarse, en algunos casos el valor medio estaría subevaluado, en otros estaría correcto, y en otros sobreevaluado*. Esto no significa que sólo podrá calcularse el J en un reducido número de casos, pues bien se sabe que la metodología empleada no busca determinar en forma exacta el J en cada zona testigo, sino determinar el mejor valor de J para cada caso, a fin de poder posteriormente realizar recomendaciones geográficas y/o realizar un retroanálisis del método de diseño AASHTO 93**; es decir trabajar con un conjunto de datos.

En síntesis la evidencia de la muestra permite establecer que:

- 1.- Puede usarse la TC en la junta instrumentada para estimar la TC media ($\alpha = 5\%$).
- 2.- La TC en la junta instrumentada no resulta ser inferior a la media ($\alpha = 5\%$).

4.3 Evolución de la TCI en el Tiempo, Verificación Recíproca de los Métodos de Base de Referencia Profunda (BRP) y FWD para Medición de TC

Resulta fundamental saber si la TC ha mostrado un detrimento en el tiempo. Lo anterior se basa en que, a medida que el tránsito se acumula, lo hace también el trabajo realizado por la junta; produciéndose un desgaste que derivaría en un supuesto claro deterioro de la transferencia de carga.

Por tal razón es necesario tener una idea del orden de magnitud de este decaimiento si es que existe. De ser significativo, los valores a emplear como transferencia de carga deberían ser alterados, ya que la base de datos de TC disponible sólo abarca, en promedio, el primer tercio de vida de diseño de los pavimentos.

Para verificar una suposición de este tipo se debe estudiar la evolución que sigue en

* Destaca el caso de Graneros, que fue rechazado por el análisis estadístico aunque ambas curvas difieran muy poco; debiéndose esto último a que existiría una ligera tendencia sistemática de la curva TCI a estar sobre TCM, según se observa en la Fig. 6.

** A este respecto, otras variables algunas tan importantes como el tránsito o las serviciabilidades también serán estimadas, resultandando unas zonas testigo sobrevaloradas y otras tantas subevaluadas, llegándose finalmente a resultados medios o generales aceptables.

el tiempo (en realidad, a medida que aumenta la sollicitación de tránsito acumulada) la TC de una misma junta. El estudio debe realizarse en una misma junta para evitar influencias no deseadas como la del ángulo con que se induce la grieta u otras.

Al analizar una junta, deben escogerse con mucho cuidado los valores que se comparan. En efecto, como la TC varía fuertemente con la temperatura, comparar dos días de invierno no es válido si además no se cumple, al menos dentro de ciertos rangos, que las temperaturas medias (se refiere a aquella de las losas) sean similares. En estricto rigor, el ideal sería poder comparar dos observaciones con temperaturas medias y gradientes térmicos que evolucionan de modo muy similar durante todo el día, ojalá midiendo en ambos con el mismo equipo.

El problema fue resuelto estudiando la junta instrumentada de las zonas testigo de Lampa, Lo Vásquez, Talagante, Paine, y San Fernando, donde se dispone de mediciones de TC entre 1986 y 1989 mediante BRP, y de mediciones de TC por FWD en mayo de 1996. Para enfrentar la restricción térmica, se buscaron en cada caso mediciones con BRP de días con comportamiento térmico parecido al observado el día de la medición con FWD, y recién entonces se procedió a comparar los valores de TC en el tiempo.

Con respecto al error que podría inducirse debido a la diferencia de métodos de medición, no hay razones teóricas que hagan presuponer un error sistemático, por lo que los valores de una muestra como esta serían comparables.

Dado el alto nivel de tránsito al que están sometidas las zonas testigo, el intervalo de tiempo considerado resulta suficiente para observar un posible decaimiento en la TC debido al desgaste ocasionado por la fricción y erosión. Cada caso aparece en las Figuras 11 a 20, en las que se ha colocado la TC y la TM a lo largo del día en forma alineada, una zona testigo por página, de modo de observar claramente cualquier tendencia debida a causas de tipo temporales.

La revisión gráfica (aquí no es posible realizar ningún test estadístico) permite establecer que no existe ninguna tendencia clara. De existir una baja generalizada de la TC al acumularse el tránsito, ésta sería muy pequeña (en promedio, no más de 8%). Esto quiere decir que, en sus primeros 10 años sería normal observar decaimientos de TC de del orden de 5%.

Por lo tanto, los valores de la base de datos debieran ser reducidos ligeramente para representar adecuadamente el promedio de la vida útil de cada pavimento.

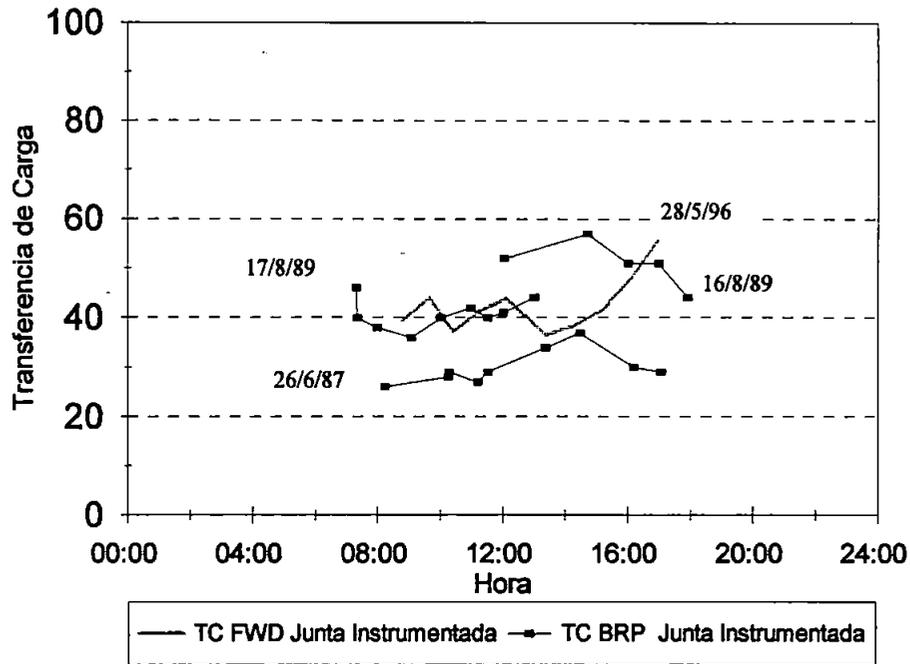


Figura 11 Comparación de la TC en Distintas Épocas de la Vida Útil bajo Condiciones de Temperatura Similares. Zona Testigo 3, Lampa

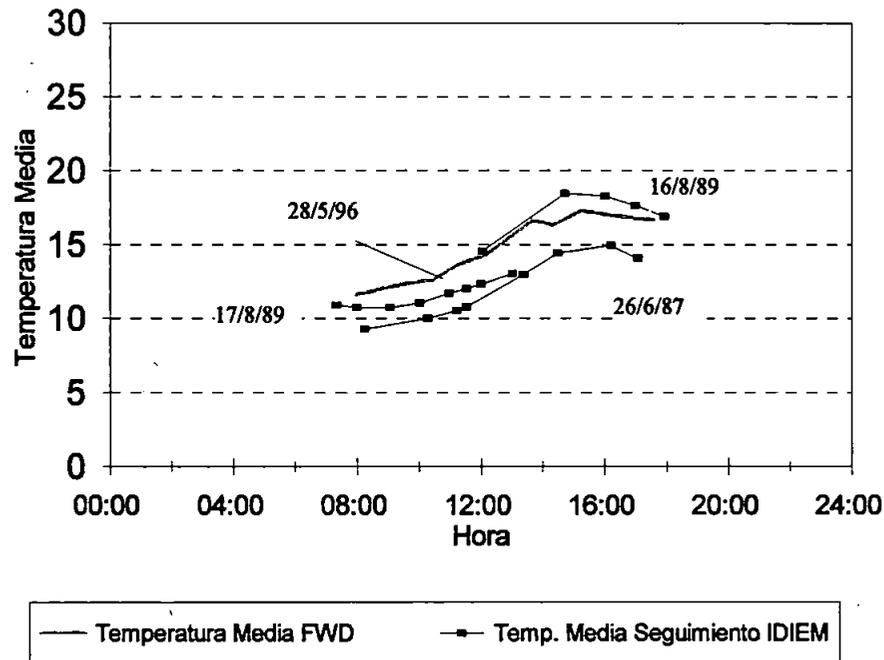


Figura 12 Evolución de la Temperatura Media de los días Comparados Zona Testigo 3, Lampa

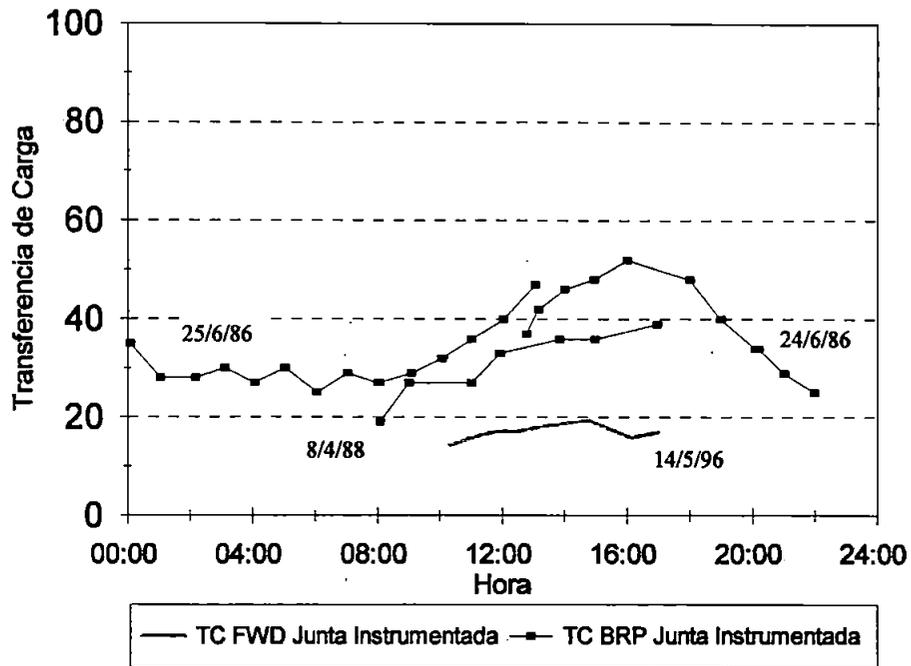


Figura 13 Comparación de la TC en Distintas Épocas de la Vida Útil bajo Condiciones de Temperatura Similares. Zona Testigo 4, Lo Vásquez

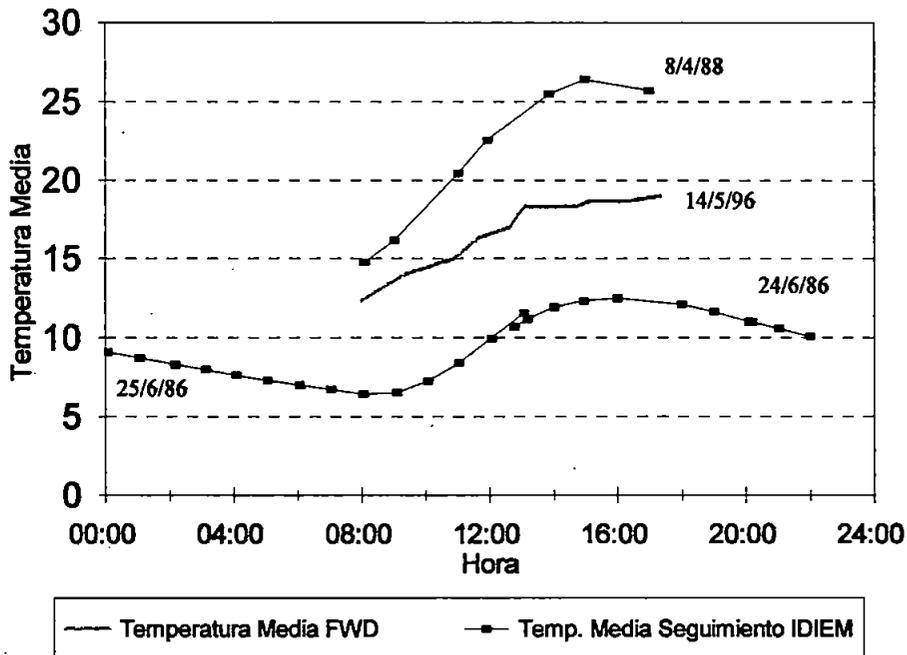


Figura 14 Evolución de la Temperatura Media de los días Comparados Zona Testigo 4, Lo Vásquez

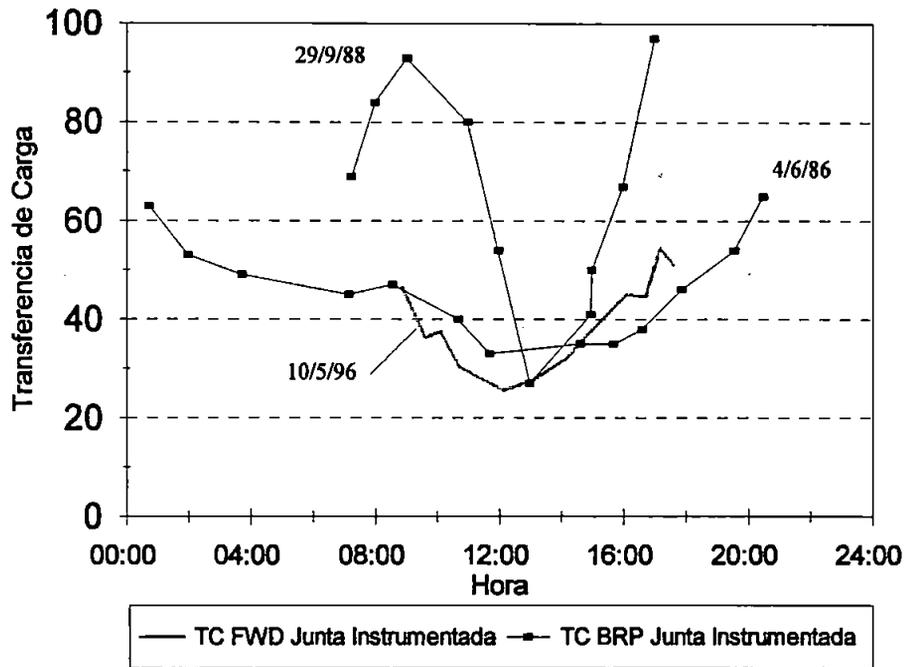


Figura 15 Comparación de la TC en Distintas Épocas de la Vida Útil bajo Condiciones de Temperatura Similares. Zona Testigo 5, Talagante

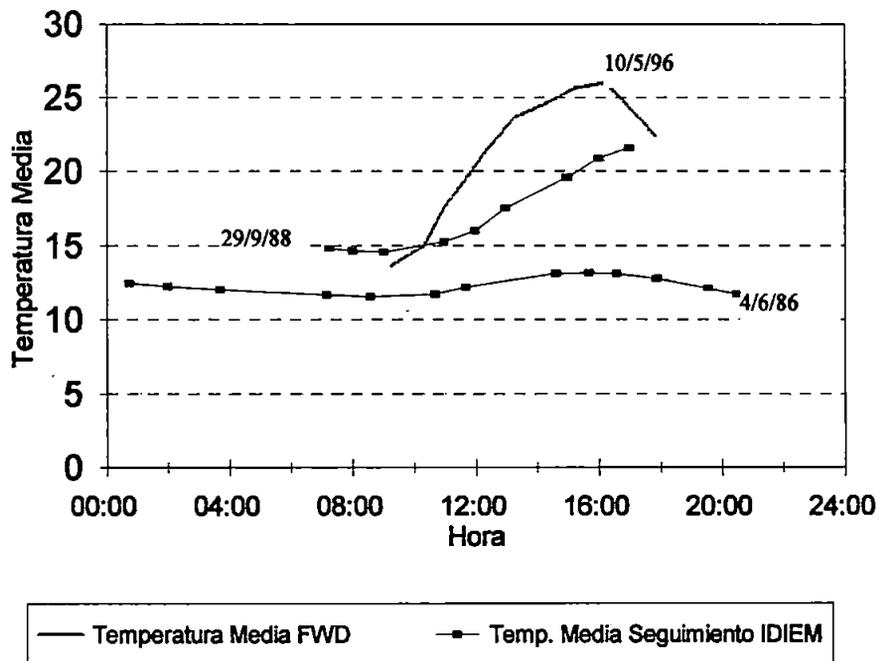


Figura 16 Evolución de la Temperatura Media de los días Comparados Zona Testigo 5, Talagante

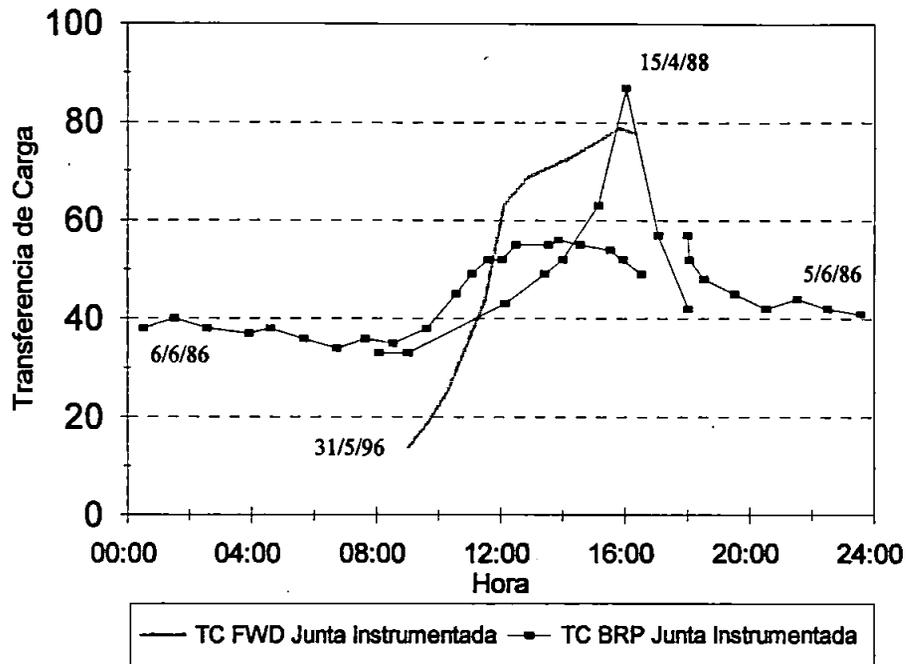


Figura 17 Comparación de la TC en Distintas Épocas de la Vida Útil bajo Condiciones de Temperatura Similares. Zona Testigo 6, Paine

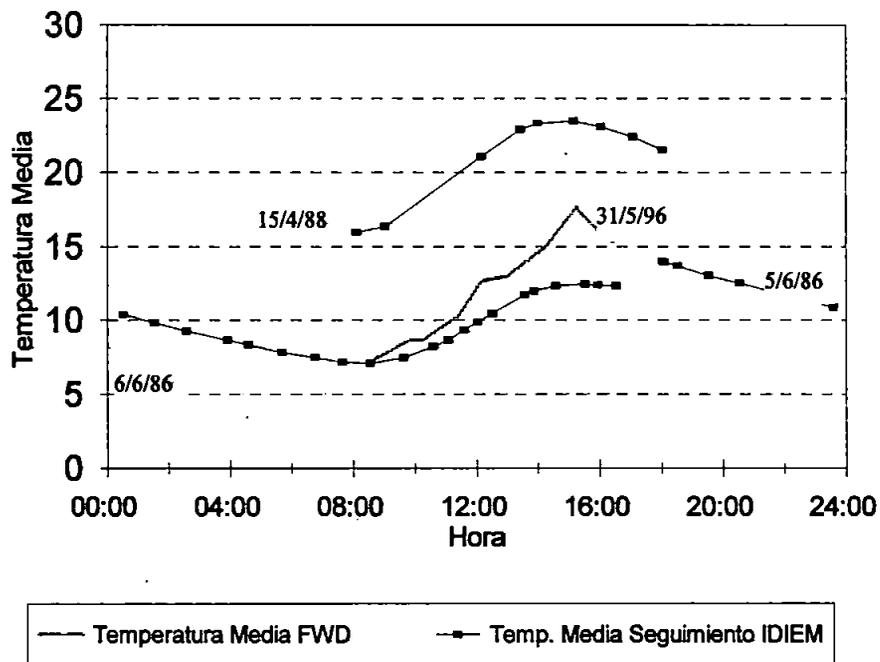


Figura 18 Evolución de la Temperatura Media de los días Comparados Zona Testigo 6, Paine

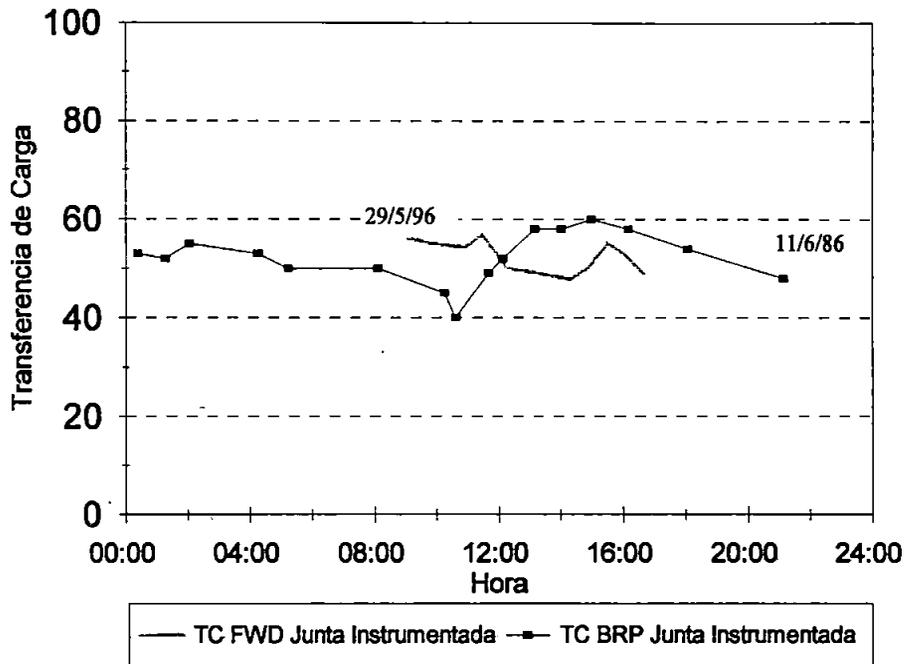


Figura 19 Comparación de la TC en Distintas Épocas de la Vida Útil bajo Condiciones de Temperatura Similares. Zona Testigo 8, San Fernando

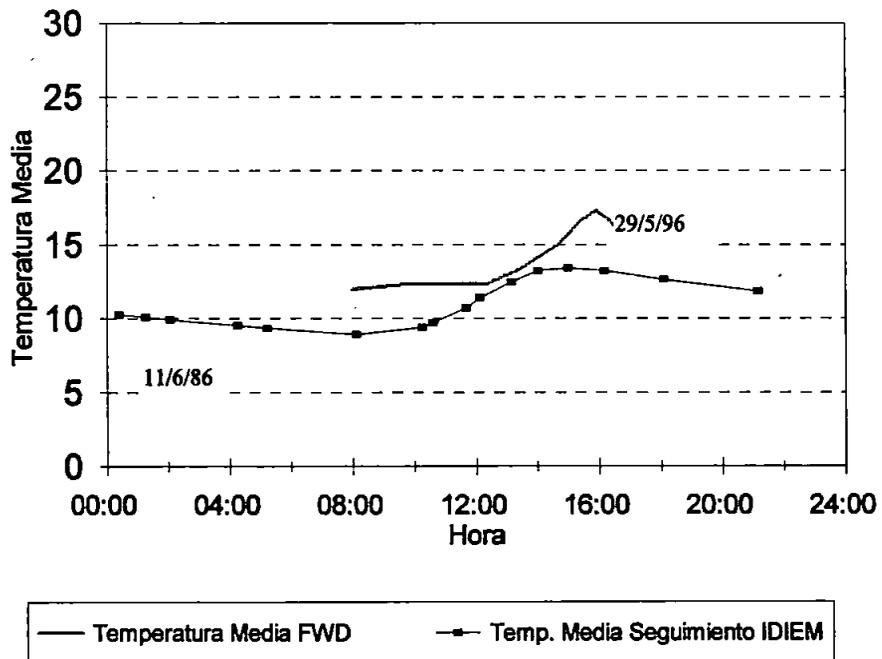


Figura 20 Evolución de la Temperatura Media de los días Comparados Zona Testigo 8, San Fernando

4.4 Consideraciones Finales

Finalmente, se decidió no alterar los valores por el concepto discutido en el capítulo anterior, pues el efecto que se detecta tendería a anularse con la suave tendencia a la baja que muestra la TCI con respecto a la TCM.

Con respecto al empleo de la base de datos:

- 1.- Se debe tener en cuenta que las anteriores consideraciones acerca de la base de datos (Capítulos 4.2 y 4.3) obligan a considerar los resultados del trabajo que se realice con ella como conjunto, nunca como zona testigo individual.
- 2.- El uso de la TCI de *una* zona testigo para calcular el J de *una* zona testigo está conceptualmente incorrecto y no tiene validez estadística alguna.
- 3.- La TCI deberá emplearse para generar los Js de todas las zonas testigo y obtener así una, o a lo más dos recomendaciones, derivadas cada una de un *promedio* de valores de J (de varias zonas testigo).
- 4.- A este respecto debe recordarse además que todas las variables del método de diseño de pavimentos AASHTO 93 emplea valores *medios*.

5. GENERACIÓN DE VALORES RECOMENDADOS PARA J EN PAVIMENTOS CHILENOS

5.1 Descripción General de la Metodología de Cálculo

El procedimiento seguido para determinar los valores del parámetro J es el siguiente:

- 1.- Se separó la base de datos por zonas testigo.
- 2.- Se separaron las mediciones de TC de acuerdo a las distintas épocas del año (otoño, invierno, primavera y verano).
- 3.- Para cada caso se generó un gráfico que incluye la variación horaria de la TC. Esto significa incluir en un sólo gráfico todas las mediciones de TC que corresponden a una misma estación, no importa el año que sea. (Se incluye el caso de Lampa, Figuras 21, 22, 23 y 24).
- 4.- Para cada caso se generó gráficamente un promedio representativo para intervalos de tiempo de 2 horas. En los casos en que la información era muy poca para establecer con claridad un comportamiento, se recurrió a extrapolar estaciones del año vecinas y zonas geográficas cercanas. (Aparece como línea continua en las Figuras 21 a 24)
5. Lo anterior permitió obtener una nueva base de datos con 864 valores medios de TC (18 zonas testigo x 4 estaciones del año x 12 intervalos de dos horas).
6. Para cada uno de los 864 valores, se calculó el J respectivo a través de la relación definida en el capítulo 3. Es decir, se dispone ahora del comportamiento de J a través del día, para cada una de la estaciones del año en 18 zonas testigo.

El paso siguiente fue buscar una forma de determinar un valor J para cada estación (día promedio de esa estación). Lo anterior debe hacerse considerando que, en pavimentos con trabazón mecánica, existe gran diferencia en el comportamiento de la TC entre la condición nocturna y la diurna; y además de ello, la circulación en nuestro país presenta gran diferencia en el tránsito (EE) que circula en cada condición. Luego,

7. Para determinar un J que sea representativo del día completo, se calculó un promedio ponderado de los 12 valores que se disponen para cada día, donde la ponderación corresponde a la fracción que representan esas dos horas en el total diario de ejes equivalentes. Para lo anterior se recurrió a información estratigráfica-horaria de un camino transversal considerado como tipo. (Figura 25)

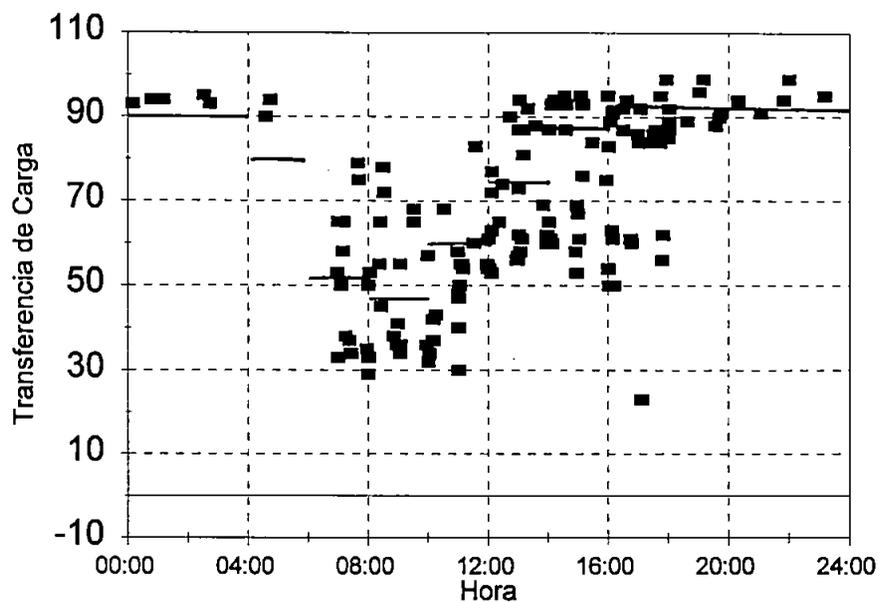


Figura 21 Distribución Horaria de la Transferencia de Carga
ZT 3 Lampa Primavera

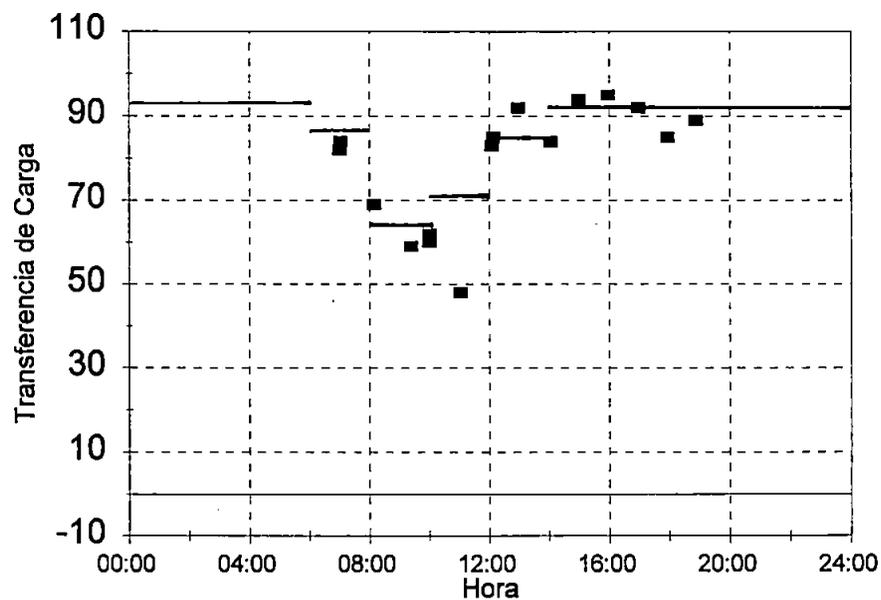


Figura 22 Distribución Horaria de la Transferencia de Carga
ZT 3 Lampa Verano

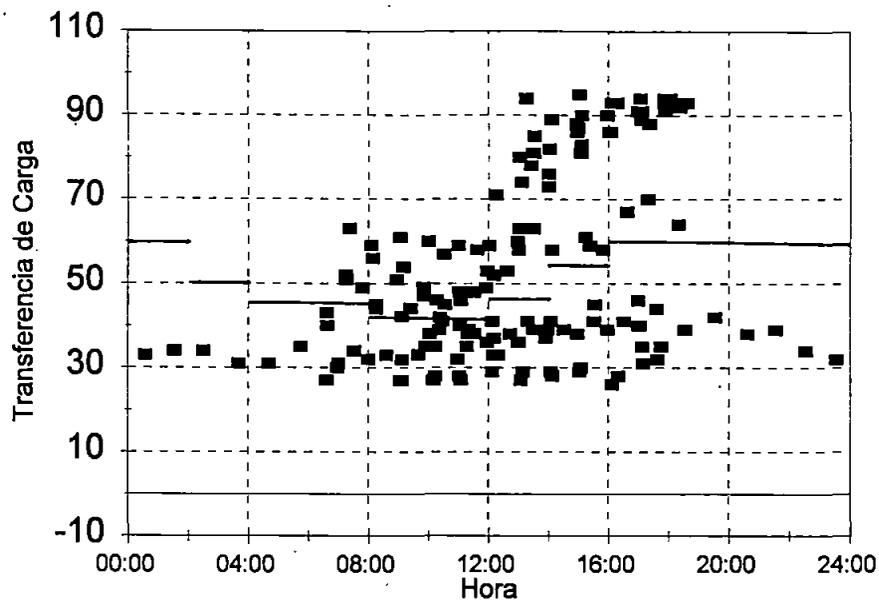


Figura 23 Distribución Horaria de la Transferencia de Carga
ZT 3 Lampa Otoño

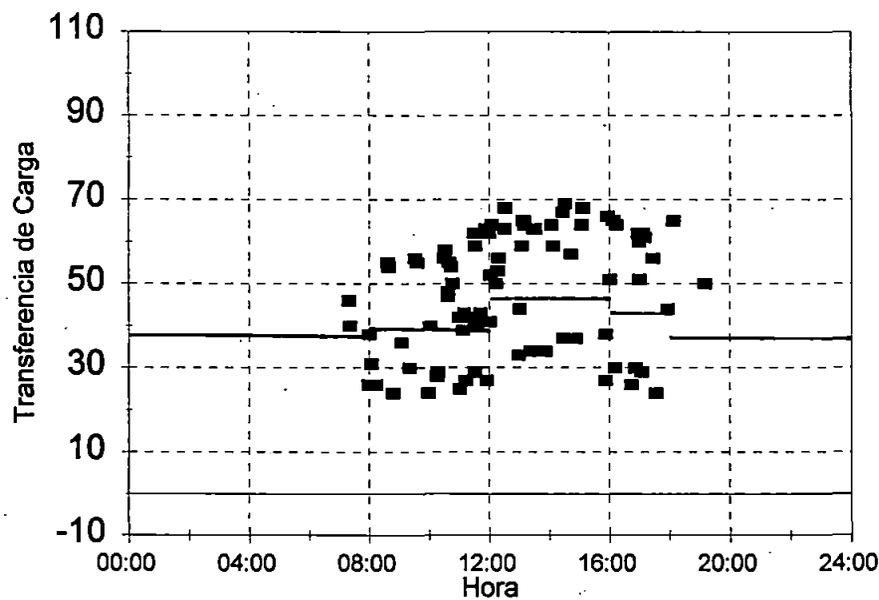


Figura 24 Distribución Horaria de la Transferencia de Carga
ZT 3 Lampa Invierno

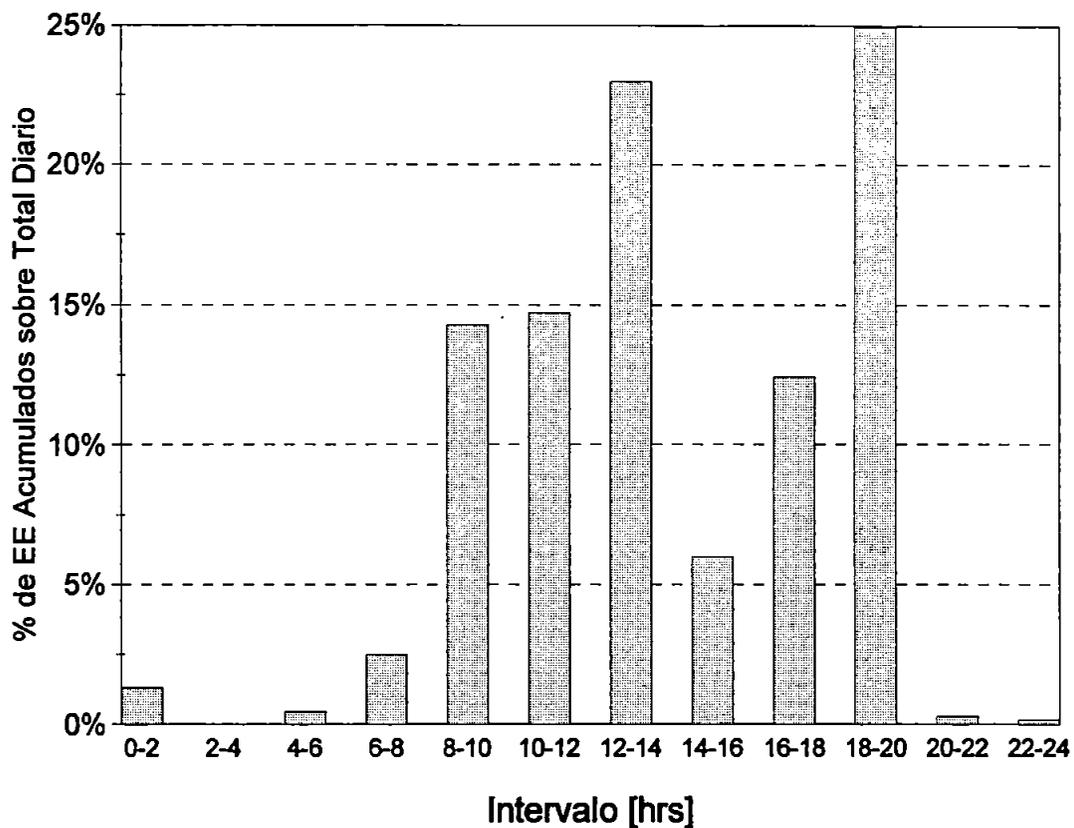


Figura 25

Distribución Horaria del Tránsito Acumulado

5.2 Valores Finales de J

Los resultados finales para cada uno de los pavimentos estudiados aparecen en la Tabla 11. Realizando las separaciones geográficas adecuadas, y calculando promedios zonales se han obtenido recomendaciones para J. De este modo, los resultados de este informe permiten concluir que los valores de J a emplear en nuestros pavimentos deben ser del orden de $J=3.6$ para la zona centro y $J=3.3$ para la zona sur.

En la zona centro los valores fluctúan entre 3.39 y 3.81, con una media de 3.59 y error esperado de ± 0.11 . Con esto, sería lógico recomendar aquí el rango **3.5 - 3.7**. Por su parte, en la zona sur, los valores fluctúan entre 3.08 y 3.55, con una media de 3.33 y error esperado de ± 0.14 . Con esto, siguiendo el mismo criterio, sería lógico recomendar aquí el rango **3.2 - 3.5**, dejando a la experiencia del usuario el valor específico a emplear.

Resulta claro que, al avanzar hacia el sur, los valores de J bajan drásticamente, reflejándose la información de la base de datos de TC. Por ejemplo, el valor máximo para la zona definida como sur es precisamente el punto ubicado más al norte dentro de este grupo. En todo caso, esta influencia climática era absolutamente esperable, pues ya en AASHTO se cita "*...lo normal es que los valores más altos [de J] estén asociados a pavimentos con bajos módulos de reacción de subrasante, altos coeficientes térmicos de hormigón, y grandes variaciones de temperatura*" (24). Por otro lado, es destacable el hecho que el valor máximo ($J = 3.81$) corresponda a Lo Vásquez, zona testigo en que la junta instrumentada (BRP), y por lo tanto aquella que proporcionó la información de TC, posee un comportamiento evidentemente por debajo de la media (Fig. 6). Sin embargo, así como este J está muy alto, habrán otros que tal vez están muy bajos, obteniéndose en conjunto buenos resultados medios. A este respecto la pequeña desviación encontrada en ambas zonas geográficas es absolutamente satisfactoria, y refuerza la idea que ambos comportamientos - centro y sur- están bien representados por sus respectivas muestras.

En el caso de Concepción, pese a ser el único con berma pavimentada, el valor obtenido es aceptable en términos de la baja generalizada observada en los otros casos, con respecto a la recomendación AASHTO. Sin embargo, este valor no puede ser tomado como recomendación. Sólo puede establecerse que es absolutamente esperable que el valor de J de pavimentos chilenos con berma pavimentada y juntas sin refuerzo está por debajo del rango que recomienda AASHTO ($J = 3.6$ a 4.4).

Por último, se recuerda nuevamente que los resultados de este estudio no son definitivos. Los valores pueden ser cambiados -tal como lo hizo la Task Force en el apéndice KK- una vez que se realice una calibración general del comportamiento de J en el método de diseño AASHTO 93. Desde este punto de vista, los resultados de este estudio deben ser considerados como los mejores posibles en base a la información disponible a este momento.

Tabla 11 Valores Finales de J para las Zonas Testigo

J A PARTIR DE MEDICIONES DE TC							
Ruta	PK	Zona Testigo	Valores Medios de J*				
			Otoño	Invierno	Primavera	Verano	AÑO
ZONA CENTRO:							
5 N	19	3 Lampa	3.83	4.07	3.32	3.16	3.596
68	85	4 Lo Vásquez	3.88	4.11	3.70	3.53	3.805
78	37	5 Talagante	3.54	3.85	3.20	2.99	3.394
5 S	54	6 Paine	3.79	4.06	3.12	2.99	3.488
5 S	74	7 Graneros	3.69	4.27	3.47	2.99	3.605
5 S	145	8 San Fernando	3.64	4.07	3.65	3.15	3.630
5 S	235	9 San Rafael	3.77	4.38	3.36	3.03	3.635
5 S	391	10 Cocharcas	3.61	3.90	3.67	3.03	3.554
		Media:	3.718	4.089	3.438	3.109	3.588
		D. Std.:	0.111	0.162	0.210	0.171	0.112
ZONA SUR:							
5 S	391	10 Cocharcas	3.61	3.90	3.67	3.03	3.554
5 S	456	12 Cabrero	3.49	3.83	3.44	2.99	3.436
5 S	477	13 Laja	3.36	3.64	3.26	2.99	3.311
5 S	562	14 C. Esperanza	3.57	3.53	3.44	3.03	3.393
5 S	614	15 Victoria	3.12	3.27	3.17	2.99	3.135
5 S	667	16 Temuco	3.37	3.76	3.33	2.99	3.361
5 S	725	17 Gorbea	3.29	3.77	3.09	2.99	3.286
5 S	745	18 Loncoche	3.38	3.78	3.08	2.99	3.308
5 S	789	19 Mariquina	3.10	3.16	3.07	3.00	3.083
5 S	798	20 Máfil	3.39	3.72	3.48	3.22	3.451
		Media:	3.369	3.634	3.303	3.021	3.332
		D. Std.:	0.159	0.233	0.193	0.068	0.135
BERMA PAVIMENTADA:							
148	73	11 Concepción	3.05	3.14	2.96	2.97	3.031

* Se ha incluido más de un decimal debido a que estos valores provienen de un trabajo estadístico.

BIBLIOGRAFIA

1. Forero, Enrique A., "Análisis del Método de Diseño AASHTO 1993 para Pavimentos de Hormigón en Chile", Memoria para Optar al Grado de Ingeniero Civil, Universidad de Chile, 1996.
2. American Association of State Highway and Transportation Officials, "AASHTO Guide For Design of Pavement Structures 1993", pp II 25-II27, AASHTO, 1993.
3. American Association of State Highway and Transportation Officials, "AASHTO Guide For Design of Pavement Structures 1993", p II 25, AASHTO, 1993.
4. American Association of State Highway and Transportation Officials, "AASHTO Guide For Design of Pavement Structures 1993", p II 26, AASHTO, 1993.
5. Darter M.I., Hall K.T., Kuo C.M. "Support Under Concrete Pavements", Final Report, investigación preparada para Transportation Research Board, University of Illinois, p 63, Diciembre 1994.
6. IDIEM - Dirección de Vialidad, "Seguimiento de Pavimentos de Hormigón", Informe Anual n°2 Mayo 1996, Vol I, IDIEM, Cap II, pp 3-5, 1996.
7. Highway Research Board. "The AASHO Road Test, Report 5, Pavement Research". Special Report 61E. Publication N° 954, National Research Council, Washington, D.C., pp 161-162, 1962.
8. American Association of State Highway and Transportation Officials, "AASHTO Guide For Design of Pavement Structures 1986", Volume II, p KK6, AASHTO, 1986
9. Ioannides A.M., Korovesis GT. "Aggregate Interlock: A Pure-Shear Load Transfer Mechanism, Transportation Research Record 1286, National Research Council, Washington, D.C., pp 14-24., 1990.
10. Teller L.W. y Cashell H.D. "Performance of Dowels Under Repetitive Loading". Public Roads, Vol 30, N° , Abril 1958, pp 1-24
11. Kilareski W.P., Ozbeki M.A. y Anderson D.A. "Fourth Cycle of Pavemente Research at the Pennsylvania Transportation Research Facility- Vol. 4: Rigid Pavement Joint Evaluation and Full Depth Patch Designs". Report FHWA/PA-84-026. The Pennsylvania Transportation Institute, The Pennsylvania State University, University Park, December 1984.
12. Ozbeki M.A., Kilareski W.P. y Anderson D.A. "Computer Simulation and Field Evaluation of Transverse Joints in Rigids Pavements". Proc., 3rd International Conference on Concrete

- Pavement Design and Rehabilitation. Purdue University, W. Lafayette, Ind., April 23-25, 1985, pp 577-586.
13. Colley B.E. y Humphrey, H.A. "Aggregate Interlock at Joints in Concrete Pavements". Bulletin 189, HRB, National Research Council, Washington, D.C., pp 1-18, 1967.
 14. Comunicación verbal con M. Darter.
 15. ILLISLAB, "Finite Element Analysis Of Jointed Concrete Pavements With a Variety Of Support Models", University Of Illinois. Programa desarrollado originalmente por Amir M. Tabatabaie (1977), revisado por K.Y. Wong (1980); expandido y revisado por A. M. Ioannides (1981-85); expandido por G. T. Korovesis (1986-88); adaptado a Ansi-77 Fortran por J.E. Conroyd (1984). Fecha de la versión empleada: 08 de Marzo de 1994.
 16. Highway Research Board, "The AASHO Road Test, Report 5, Pavement Research", p 228, Publication N° 954, National Academy of Sciences-National Research Council, Washington DC, 1962.
 17. Ioannides A.M. "Analysis of Slabs-on-Grade for a Variety of Loading and Support Conditions", Tesis para optar al grado de Doctor en Filosofía en Ingeniería Civil, University of Illinois at Urbana Champaign, 1984.
 18. IDIEM - Dirección de Vialidad, "Control y Seguimiento de Pavimentos de Hormigón", Informe Anual 1985, Vol I, IDIEM, p 63, 1986.
 19. Ioannides A.M. "Analysis of Slabs-on-Grade for a Variety of Loading and Support Conditions", Tesis para optar al grado de Doctor en Filosofía en Ingeniería Civil, University of Illinois at Urbana Champaign, 1984.
 20. Comunicación verbal con M. Darter.
 21. American Association of State Highway and Transportation Officials, "AASHTO Guide For Design of Pavement Structures 1993", p III 120, AASHTO, 1993.
 22. Poblete M., Valenzuela R., Salsilli R., "Load Transfer in Undoweled Transversal Joint of PCC Pavement". Pavement Design Transportation research Record, TRB 1207, Washington D.C., 1988.
 23. Walpole, Ronald E. y Myers, Raymond H., "Probabilidad y Estadística", tercera edición en español de "Probability and Statistics for Engineers and Scientists", McGraw - Hill, p 300, México, 1992.
 24. American Association of State Highway and Transportation Officials, "AASHTO Guide For Design of Pavement Structures 1993", p II 25, AASHTO, 1993.