

Título: GRADIENTE DE CONSTRUCCIÓN EN CHILE Y SU EFECTO EN EL COMPORTAMIENTO DE LOS PAVIMENTOS DE HORMIGÓN

Autores:

Juan Pablo Covarrubias V., Ing. Civil, TCPavements

Avenida Suecia 84, Oficina 103, Santiago, Chile

E-mail: juanpablo.covarrubias@tcpavements.com

Tel + 56 2 658 1321

Victor Roco, Ing. Civil

Jefe LNV MOP Chile

E-mail: victor.roco@mop.gov.cl

Carlos Binder E, Ing. Civil, TCPavements

Avenida Suecia 84, Oficina 103, Santiago, Chile

E-mail: cbinder@tcpavements.com

Tel + 56 2 658 1320

Sustentabilidad en el Diseño, Construcción y Gestión Vial

10^{mo} Congreso PROVIAL

8 - 11 de Octubre de 2012, Santiago

Fecha de envío:	30 de abril 2012
Número de palabras:	6741 palabras
Número de figuras y tablas:	20 (1000 palabras)
TOTAL	26741 palabras

Resumen

El alabeo de construcción de una losa de hormigón es una curvatura permanente en que los bordes de la losa de hormigón se encuentran levantados producto de dos fenómenos que ocurren durante el fraguado e inicio de endurecimiento del hormigón. Este comportamiento se produce principalmente por dos factores: un gradiente de humedad y por diferencias de temperatura entre la parte superior y la parte inferior de la losa. Se ha demostrado que esta curvatura residual influye de forma importante el rendimiento de los pavimentos de hormigón. El alabeo de construcción produce que grandes regiones de la losa no tengan contacto con la capa soportante, lo que cambia la ubicación y aumenta la magnitud de la tensión de tracción máxima producido por cargas mecánicas. Dos proyectos en Chile fueron estudiados para medir este gradiente de construcción, analizar su desempeño y determinar si los procedimientos actuales de diseño permiten predecir y explicar las diferencias en el desempeño. En ambos estudios, el gradiente de construcción mostro ser relevante y con un efecto importante en el comportamiento del pavimento. En el primero de los dos proyectos, el cual tenía una curvatura exagerada, es decir un gradiente de construcción elevado, produjo fallas prematuras en el pavimento a pocas horas de estar abierto al tráfico. Para evitar las fallas prematuras producidas en este pavimento, la primera solución sería incrementar el espesor del pavimento en un 59% y la segunda alternativa es la de reducir las dimensiones de la losa, solución finalmente utilizada, a 2,15 m x 1,75 m. En el segundo proyecto se evaluó las diferentes curvaturas por pavimentar de día o realizar la faena de noche, se demostró que una sección de pavimento construido de noche tiene un mejor desempeño que una sección construido de día en meses de verano, al tener menor alabeo de construcción

1.- Introducción

Casi la totalidad de los pavimentos de hormigón existentes en la actualidad fueron construidos entre 1980 y 1995, los cuáles fueron diseñados según el método AASHTO. Las losas tenían espesores de 18 a 25 cm, con bases granulares y no se utilizó barras de traspaso de carga. En algunos pavimentos de hormigón, se utilizaron bases estabilizada con cemento, que fallaron en forma prematura y tuvieron un desempeño general muy pobre. Los pavimentos de hormigón construidos sobre bases granular por su parte han tenido comportamientos muy diferentes entre ellos. Algunas secciones fallaron antes de tiempo, pero otros en cambio se encuentran todavía en servicio, donde casi se ha doblado el tráfico de diseño original. Las prácticas constructivas y los materiales utilizados no eran muy diferentes entre proyecto a otro, en términos de: agregado, cemento, agua, aditivos y proporciones de la mezcla. Por lo tanto los métodos empíricos no son suficientes para predecir y explicar el comportamiento de estos pavimentos. Las mediciones realizadas en Chile (1),(2) y en otros países, han revelado la gran mayoría de las losas de hormigón tienen una condición inicial de alabeo hacia arriba, como se ve en la Tabla 1. Cuando esta geometría se combina con la carga de los camiones, se traduce en esfuerzos de tracción críticos en la parte superior de la losa y por lo tanto deben ser considerados en el diseño estructural del pavimento de hormigón (3).

Tabla 1. Resumen de alabeo de construcción en distintos pavimentos (después de Bordelon et al. 2009)

Lugar/ID	Alabeo de Const.(°C)	Comentario	Referencia
<i>Perfil Superficial (usando varilla de nivel a menos que se indique otro modo)</i>			
All LTPP GPS3 Sections ^a	Hasta -44	Múltiples geometrías / confinada	Byrum 2000
I-80 in Pennsylvania	-37	Dovelas / 6 m largo	Yu et. al. 2001
AZ1 in Phoenix, Arizona	-15.2 ^b	Sin Dovelas / Berma de Asfalto / 4.5m largo Losa	C. Rao et. al. 2001
	-23.9 ^c		
AZ3 in Phoenix, Arizona	-23.1 ^b	Sin Dovelas / Berma de Asfalto / 6m largo Losa	
	-29.1 ^c		
AZ4 in Phoenix, Arizona	-11.8 ^b	Dovelas / Berma hormigón amarrada / 6m largo Losa	
	-20.0 ^c		
Mankato, Minnesota	-22.8 ^b	Sin Dovelas / Berma de Asfalto	
	-27.4 ^c		
<i>Mediciones de deflexiones (usando FWD/HWD a menos que se indique otro modo)</i>			
I-70 in Colorado ^d	-11,1	Dovelas / Berma hormigón amarrada	Yu et. al. 1998
Florida ^d	-5	Sin Dovelas	Armaghani et. al. 1987
Chile ^d	Hasta -19.2	Múltiples secciones	Poblete et. al. 1988
I-80 en Pennsylvania ^d	-8,9	Base granular permeable	Yu et. al. 2001
	-6,7	Base de asfalto permeable	
Palmdale, California	-22,7	Sin Dovelas/ Berma de Asfalto	S. Rao and Roesler 2005b
	-9,8	Dovelas / Berma hormigón amarrada	
	-17,2	Sobrecancho / Berma de Asfalto	
Ukiah, California	-10	Sin Dovelas / Berma de Asfalto	S. Rao and Roesler 2005b
DIA Denver, Colorado ^e	-5 a -8	Pavimento de Aeropuerto de 43cm	Rufino 2003

^a Usando perfilometro de alta velocidad

^b 3 días después de construir

^c 40 días después de construir

^d Usando medidores de superficie externos para deflexiones.

^e Usando deflectómetros a múltiple profundidad

El alabeo total de una losa de hormigón es una combinación de cinco componentes de temperatura equivalentes (4), como se aprecia en la siguiente ecuación. Estos factores se ven afectados significativamente por las condiciones climáticas locales, parámetros de mezclado del hormigón, propiedades del hormigón endurecido y técnicas constructivas.

$$T_{tot} = T_{tg} + T_{mg} + T_{bi} + T_{shr} - T_{crp} \quad (1.1)$$

Con:

- T_{tot} = Diferencial Total Equivalente de Temperatura (TELTD);
- T_{tg} = Corresponde a la componente producida debido a variaciones en las condiciones climáticas diarias, lo que da lugar a un gradiente de temperatura no lineal a lo largo del espesor de la losa;
- T_{mg} = Gradiente de humedad que ocurre debido a que la superficie superior de la losa está parcialmente saturada a diferencia de la parte inferior que se encuentra totalmente saturada;
- T_{bi} = Componente originada debido a la existencia de un gradiente termico no lineal positivo dentro de la losa de hormigon durante la colocacion
- T_{shr} = Gradiente no lineal de humedad originada debido a una perdida irreversible de humedad en la losa, siendo mayor en la parte superior que en la inferior;
- T_{crp} = Componente asociado al creep (deformacion plastica) del hormigon, debido a las tensiones generadas por losas adyacentes y de borde, asi como el peso propio.

El efecto acumulado del diferencial de temperatura, retracción y creep puede ser definido como un diferencial de temperaturas efectivo como se muestra en las ecuaciones (1.2) y (1.3). El EBITD se define como un diferencial térmico entre la cara superior e inferior de la losa de hormigón, que produce una deformación similiar al efecto acumulado no lineal de temperatura de construcción mas un perfil de humedad, reducido en el tiempo por creep del hormigón.

$$T_{tot} = T_{tg} + \text{EBITD} \quad (1.2)$$

$$\text{EBITD} = T_{mg} + T_{bi} + T_{shr} - T_{crp} \quad (1.3)$$

La magnitud total del alabeo de una losa (T_{tot}) debido a la combinación de los distintos factores, puede ser representado por un diferencial efectivo de temperatura, es decir un diferencial total de temperatura efectivo (TELTD). La ecuación (1.4) muestra que el EBITD puede ser medido en terreno si se mide el perfil de temperatura (T_{tg}) a través de la losa durante pruebas de deflexiones y luego determinando el TELTD a través de un análisis de retrocalculo.

$$\text{EBITD} = \text{TELTD} - T_{tg} \quad (1.4)$$

2.- Estudio de en la Ruta 60 y 78

Se estudiaron 2 proyectos para cuantificar la magnitud del alabeo de construcción y sus efectos en el desempeño de un pavimento de hormigón. El primer proyecto fue realizado en la ruta 78 entre las ciudades de Melipilla y Leyda (Km. 67.350 a 92.930). Este proyecto cuenta con un pavimento de hormigón de sección transversal trapezoidal de 26 cm en el borde externo y 22 cm en el borde interno, 15 cm de base granular, berma asfáltica y sin barras de traspaso de carga. Fue construido desde 1992 a 1995 en tres etapas diferentes y tiene la particularidad de que una etapa fue pavimentada durante la noche, mientras que las otras dos etapas fueron pavimentadas durante el día en época de verano. En el sector en que se encuentra el proyecto predomina un clima seco sin heladas, la temperatura máxima en

verano alcanza los 35°C mientras que la mínima se encuentra levemente superior a 0°C. Las diferencias de las condiciones climáticas durante la pavimentación han tenido un efecto importante en el desempeño de éstos (5). El tramo construido de noche se ha desempeñado de forma positiva, encontrándose en la actualidad sin grietas y con niveles de IRI y escalonamiento menores al máximo permitido. Las otras dos secciones en cambio han empezado a deteriorarse ya que un 5% de sus losas poseen grietas transversales y niveles altos de IRI y escalonamiento.



Figura1. Ruta 78 Sección D (Km 90.000 a Km 92.930) pavimentado durante el día.

El segundo proyecto en estudio, es un tramo de la ruta 60 de aproximadamente 2 km en la pista de bajada, frente a la Comisaria de Carabineros de Guardia Vieja. El tramo fue construido en Enero del 2010 y conecta Los Andes y Mendoza, (Figura 2). El camino fue diseñado para 20 millones de ejes equivalentes usando el método AASHTO 1998, dando como resultado losas de hormigón de 22 cm de espesor, con una resistencia a la flexotracción de 4,9 MPa. Las capas soportantes del pavimento consisten en un base granular no heladiza de 15 cm (menos de 5% del material pasa la malla #200) CBR > 50% sobre un suelo con un coeficiente de balasto de 137 MPa/m. Las dimensiones típicas de la losas fueron de 4,5 m de largo por 3,5 m de ancho sin barras de traspaso de carga en las juntas ni bermas estabilizadas. Se colocó una membrana de curado en base a resina y el pavimento fue abierto a tránsito a partir de los 13 días con tramos, abiertos a las 21 días. Después de 10 días el tramo en estudio tenía más del 67% de las losas agrietadas. Un mes más tarde comenzaron a aparecer grietas longitudinales en las losas. Este proyecto está ubicado en una zona seca y con heladas a una elevación de 1.600 m sobre el nivel del mar y por lo tanto las condiciones climáticas son extremas entre el día y la noche y entre una estación y otra. Los cambios de temperatura entre el día y la noche pueden ser mayores a 15°C con una temperatura máxima en verano de 28°C y una mínima en invierno de -5°C. Para este proyecto la temperatura del hormigón durante la colocación fue por sobre los 30°C.



Figura 2. Ruta 60 entre Los Andes (Chile) y Mendoza (Argentina)

Dentro de los diferentes tramos de la ruta 78 y comparando la ruta 60 y 78, el pavimento de hormigón se desempeña de forma diferente, lo cual no puede ser explicado por la guía de diseño AASHTO 1993 (6) y 1998 (7). La Guía de Diseño Empírica-Mecanicista M-E PDG (8) fue seleccionada para determinar si las diferencias observadas pueden ser predichas en base a las condiciones climáticas existentes y al alabeo de construcción. Por lo tanto el EBITD fue medido en terreno para los dos proyectos y luego se utilizó el M-E PDG para analizar el desempeño, con un tráfico acumulado, el EBITD, las propiedades de las capas y los materiales, el clima y la geometría de las losas.

2.1- Métodos para medir el EBITD

Para calcular el EBITD, se utilizaron dos métodos diferentes de medición para cada proyecto: uno realizando ensayos con el deflectómetro de (FWD) y otro a través del perfil de la superficie de la losa. Si bien algunas investigaciones han medido el alabeo de construcción mediante la curvatura de la superficie (9) y (10), otras investigaciones han concluido que las mediciones a través de la curvatura de la superficie tienden a sobreestimar el alabeo de construcción (11). Para poder realizar el retro cálculo del EBITD con cualquiera de los métodos es necesario un análisis con elementos finitos, en que es esencial que los parámetros de entrada sean precisos. Las dimensiones de la losa pueden ser obtenidas por observaciones en terreno. El espesor del pavimento, las propiedades del material (módulo de elasticidad, peso unitario y módulo de Poisson) y condiciones de borde pueden ser obtenidos por antecedentes de construcción y ensayos destructivos y no destructivos.

2.1.1- Ruta 60: Diferencias de Elevación en la Superficie

Para este proyecto, se dispuso únicamente de equipo topográfico para estimar el perfil de la superficie de la losa. Fue posible calcular las alturas entre las esquinas y el centro de la losa en dos momentos distintos del día. Con la geometría de la losa y las propiedades del material, se usó el software de elementos finitos ISLAB2000 para hacer retro análisis y así obtener el diferencial equivalente de temperatura que produce la misma magnitud de alabeo medido y la diferencia de elevación de las esquinas interiores. Se colocaron termocuplas en el pavimento para medir la diferencia de temperatura entre la parte superior e inferior de la losa al

momento de realizar las mediciones. El alabeo de construcción (EBITD) fue calculado restando la diferencia de temperatura medida del diferencial de temperatura obtenido a través del retroanálisis como se muestra en la ecuación (1.3).

2.1.2- Ruta 78: Método a través del Deflectómetro de Impacto (D.I.)

El EBITD también fue estimado a través del método del deflectómetro de impacto y las deflexiones en las esquinas para determinar la respuesta de la losa de hormigón debido al alabeo residual y reversible (4). Generalmente se prefiere este método. A continuación se muestra un breve resumen de este procedimiento.

1° Etapa: Recopilación de Datos en Terreno y Retranálisis Se dejó caer el plato de carga del Deflectómetro de Impacto en la esquina de la losa y se midieron las deflexiones bajo el plato de carga y a través de la junta transversal. Las deflexiones a ambos lados de la junta permiten estimar la eficiencia en el traspaso de carga a través de la junta. Para cada losa se obtuvieron las deflexiones a ambas esquinas externas de la losa a tres niveles de carga. Luego es necesario el valor del módulo de reacción de la subrasante (k) para obtener de forma precisa la contribución de la rigidez del suelo a la deflexión de la esquina de la losa. Con el fin de obtener por retro cálculo el k dinámico del suelo y el módulo de elasticidad del hormigón es que se realizó deflectometría de impacto en el centro de la losa. Fue necesario también saber la diferencia de temperatura en la losa, en el momento de la deflectometría de impacto, para determinar el EBITD. La temperatura en la superficie superior se obtuvo directamente por el sensor del D.I., en tanto que la temperatura inferior se obtuvo midiendo la temperatura inferior a través de un agujero rellenado con aceite.

2° Etapa: Interpolación de las Deflexiones en las Esquinas Las deflexiones en las esquinas son medidas para tres niveles de carga del D.I. Para minimizar el número de iteraciones que el programa de elementos finitos realiza, se deberá interpolar las cargas registradas por el sensor del deflectómetro de impacto a tres niveles de carga predeterminados.

3° Etapa: Análisis de Elementos Finitos Es necesario un programa de elementos finitos que pueda analizar el comportamiento de una losa de hormigón, bajo la acción de temperatura y cargas mecánicas, como por ejemplo el ISLAB2000. En este punto se debe modelar la estructura del pavimento, de modo que simule con la mayor similitud posible, las condiciones en que se realizó el ensayo de deflectometría de impacto. Para esto se debe realizar un análisis de elementos finito por cada nivel de carga. La modelación debe necesariamente incluir los siguientes parámetros:

- Espaciamiento de las juntas y ancho de la losa
- Plato de carga del deflectómetro (tres niveles y sin carga)
- Valor k (dinámico) del suelo
- Transferencia de carga entre dos losas de hormigón
- Transferencia de carga entre la losa de hormigón y la berma
- Propiedades de los materiales (espesores, módulos, coeficientes de expansión térmicos, módulos de poisson, pesos unitarios, condiciones de apoyo base-losa hormigón)
- Geometría de la Carga y Posición (una carga cuadrada con la misma área que el plato de carga del deflectómetro de impacto).

El análisis es realizado, para diferenciales de temperatura de la losa de entre -50°C hasta 0°C, en incrementos de 2 a 3°C. La deflexión generada debido a la carga del deflectómetro de

impacto es la diferencia entre la deflexión de la losa cargada (carga + temperatura) y la deflexión de la losa descargada (solo temperatura). Los resultados del análisis son un gráfico de deflexión v/s gradiente total de temperatura (TELTD) como se observa en la figura 3.

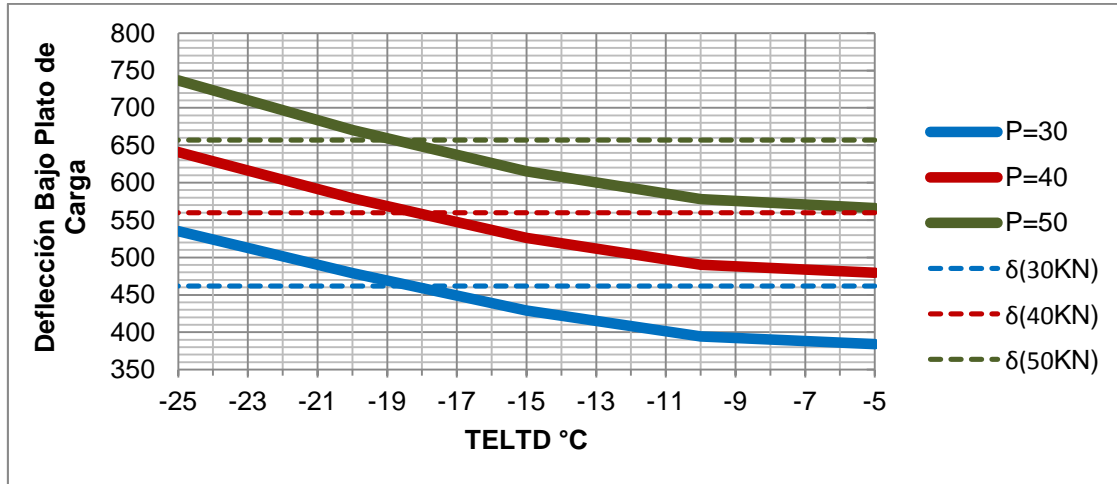


Figura 3: Comparación de las deflexiones medidas por el D.I. (líneas discontinuas) y deflexiones calculadas por ISLAB2000 (líneas continuas) a diferentes niveles de carga y diferencial total efectivo de temperatura (TELTD).

4ª Etapa: Estimar TELTD y EBITD Con las mediciones en terreno, se ubica en el gráfico el punto en que intersecta la curva obtenida con el programa de elementos finitos para cada nivel de carga. Ese punto es el TELTD de cada nivel de carga. Luego el EBITD es la diferencia entre el TELTD y el diferencial de temperatura de la losa al momento de realizar la deflectometría de impacto.

2.2.1- EBITD Medido en la Ruta 60

Las diferencias de elevación entre el centro y las esquinas de la losa fue medido en varias losas en diferentes momentos del día (tabla 2). El nivel de alabeo negativo en estas losas fue extremo y las losas se agrietaron de forma significativa en menos de 24 horas, incluso antes de la apertura a tráfico.

Tabla 2. Diferencias de Elevación entre la Esquina y el Centro en Losas en la Mañana (8:00) y la Tarde (15:00).

Hora	Losa (N°)				
	1	2	3	4	5
8:00	11 mm	11 mm	11 mm	14 mm	8 mm
15:00	8 mm	10 mm	9 mm	14 mm	7 mm

La tabla 3 muestra los resultados del retro cálculo, usando ISLAB 2000 en términos de diferencial de temperatura que produce la misma diferencia en elevación del centro de la losa con sus esquinas. Debido a que las termocuplas insertadas en el pavimento no midieron correctamente la temperatura del pavimento, el diferencial de temperatura entre la parte superior e inferior de la losa fue estimado usando un Modelo Climático incorporado en el M-EPDG . Se utilizó la estación climática de Palmdale, California ya que tiene similar clima,

latitud y altitud que el lugar de emplazamiento del tramo de la Ruta 60. La tabla 3 muestra el diferencial de temperaturas predicho [ΔT ($^{\circ}\text{C}$)] durante el ensayo. El promedio de EBITD calculado de la Ruta 60 fue -41°C . Esta magnitud de EBITD fue consistente con otros estudios de superficie mostrados anteriormente en la Tabla 1. El alto nivel de alabeo residual cóncavo conlleva a modos alternativos de agrietamiento y esa es la explicación de agrietamiento prematuro del tramo.

Tabla 3. TELTD y EBITD Valores de 5 Losas en la Ruta 60

Hora de Medición	Número de Losa					TELTD $^{\circ}\text{C}$ (Promedio)	Losa	
	1 ($^{\circ}\text{C}$)	2 ($^{\circ}\text{C}$)	3 ($^{\circ}\text{C}$)	4 ($^{\circ}\text{C}$)	5 ($^{\circ}\text{C}$)		ΔT ($^{\circ}\text{C}$)	EBITD ($^{\circ}\text{C}$)
8:00	-35	-35	-35	-42	-26	-35	+5	-40
15:00	-26	-31	-28	-42	-22	-30	+12	-42
							Promedio	-41

2.2.2--EBITD Medido en la Ruta 78

El tramo completo de hormigón fue dividido en 4 subtramos, el Subtramo A (Km 67.350 a Km 81.250), Subtramo B (Km 81.250 a 83.670), Subtramo C (Km 83.670 a Km 90.000), y Subtramo D (Km 90.000 a Km 92.930). El Subtramo A fue pavimentado durante la noche, mientras los otros tres subtramos (B, C, y D) fueron pavimentados durante el día. El método propuesto por Rao y Roesler (4) fue mejorado, incluyendo en el análisis de elementos finitos el peso de las ruedas del D.I. y las ruedas del vehículo que remolca el D.I. Como se muestra en las tablas 4 y 5, el Subtramo A fue pavimentado de noche, tiene un EBITD menos negativo que los otros tres subtramos pavimentados durante el día. El tramo de la ruta 78 tiene menor EBITD promedio que la ruta 60, pero se ubica en un clima menos severo y el método utilizado para medir el EBITD es diferente. Todos los subtramos de la ruta 78 tienen un mayor EBITD ($\Delta T = -16.2^{\circ}\text{C}$) que el valor por defecto ($\Delta T = -5.6^{\circ}\text{C}$) de la Guía Empírica-Mecanicista de Diseño de Pavimento (ME-PDG)

Tabla 4. TELTD y EBITD Medido en el subtramo A de la Ruta 78

Ubicación (Km)	Temperatura, Arriba	Temperatura, Abajo	TELTD	EBITD
75.000	13.8 $^{\circ}\text{C}$	18.2 $^{\circ}\text{C}$	-12.8 $^{\circ}\text{C}$	-8.4$^{\circ}\text{C}$
75.003	13.8 $^{\circ}\text{C}$	18.2 $^{\circ}\text{C}$	-14 $^{\circ}\text{C}$	-9.6$^{\circ}\text{C}$
75.500	12.8 $^{\circ}\text{C}$	18.1 $^{\circ}\text{C}$	-18.5 $^{\circ}\text{C}$	-13.2$^{\circ}\text{C}$
75.503	12.8 $^{\circ}\text{C}$	18.1 $^{\circ}\text{C}$	-18.3 $^{\circ}\text{C}$	-13.0$^{\circ}\text{C}$
Promedio				-11$^{\circ}\text{C}$

Tabla 5. TELTD y EBITD Medido en los subtramo B,C y D de la Ruta 78

Ubicación (Km)	Temperatura, Arriba	Temperatura, Abajo	TELTD	EBITD
82,400	12.4 $^{\circ}\text{C}$	17.2 $^{\circ}\text{C}$	-14 $^{\circ}\text{C}$	-9.8$^{\circ}\text{C}$
82,403	12.4 $^{\circ}\text{C}$	17.2 $^{\circ}\text{C}$	-18.7 $^{\circ}\text{C}$	-13.9$^{\circ}\text{C}$
82,800	13.4 $^{\circ}\text{C}$	18.3 $^{\circ}\text{C}$	-26.3 $^{\circ}\text{C}$	-21.4$^{\circ}\text{C}$
82,803	13.4 $^{\circ}\text{C}$	18.3 $^{\circ}\text{C}$	-26.6 $^{\circ}\text{C}$	-21.7$^{\circ}\text{C}$
92,000	12.1 $^{\circ}\text{C}$	16.7 $^{\circ}\text{C}$	-19.8 $^{\circ}\text{C}$	-15.2$^{\circ}\text{C}$
92,003	12.1 $^{\circ}\text{C}$	16.7 $^{\circ}\text{C}$	-19.9 $^{\circ}\text{C}$	-15.3$^{\circ}\text{C}$
Promedio				-16.2$^{\circ}\text{C}$

3.- Desempeño del Pavimento de la Ruta 60

El pavimento fue abierto a tráfico 13 días después de terminada su construcción. En las primeras 48 horas el 67% de las losas se encontraban agrietadas transversalmente. Inmediatamente este tramo fue cerrado al tráfico para analizar las causas de estas fallas, mientras que otros tramos aledaños, no fueron abiertos a tráfico ante la posibilidad latente de que ocurriera lo mismo. La figura 4 muestra las grietas transversales en la losa. Luego de un mes, aparecieron grietas longitudinales en algunas de las losas, como se ve en la figura 4. Con el fin de explicar este fenómeno, se utilizó el software ISLAB2000 para calcular la tensión crítica en la parte superior del pavimento y luego se implementó el algoritmo de fatiga del M-EPDG. La tabla 6 muestra los parámetros utilizados en las corridas del ISLAB2000, la tensión de tracción incluyendo el número de repeticiones de carga necesarios para producir un 20% de losas agrietadas.



Figura 4. Ruta 60 – 4,5 m largo por 3.5 ancho losas diseñadas por AASHTO 1998, con las losas agrietadas.

Con las mediciones de superficie obtenidos y el retrocálculo del EBITD, se asumió un valor de -25°C con -10°C de diferencial de temperatura en la noche. Con la geometría y espesor de las losas, el nivel de alabeo de construcción y clima en el lugar, es esperable que este tramo fallase, con un esfuerzo de tracción de 4.9 MPa.

Tabla 6. Comparación de distintas condiciones del pavimento.

Pavimento de Hormigón Caso Analizado	Esfuerzo de Tracción Máximo (MPa)	N° de Repeticiones de carga para 20% de Losas Agrietadas	Espesor (cm)	Largo de la Losa (cm)	Diferencial de Temperatura Equivalente (°C)	Distancia entre Eje Delantero y Trasero (cm)	K _c (MPa/m)
Diseño y alabeo de construcción actual	4.9	105	22	450	-35	350	120
Losas de 3m con eje delantero	3.3	1785	22	300	-35	350	120
Losas de 3m con eje trasero	3.4	1329	22	300	-35	250	120
AASHTO 1998 considerando EBITD Normal	2.2	192,028	22	450	-6	350	120

Para comparar el método de diseño AASHTO 1998 con el M-E PDG, se utilizaron inputs similares, como se muestra en la tabla 7, exceptuando que se utilizó un alabeo de construcción equivalente de -6°C como input para el M-EPDG. El espesor de hormigón necesario fue de 22 cm para el M-EPDG, muy similar a lo que entrega el método de diseño AASHTO 1998. Si se utiliza un alabeo equivalente de construcción de -25°C (valor medido en terreno), necesitaría un espesor de 37 cm para tener un nivel de agrietamiento similar a la predicción del AASHTO 98. Por lo tanto, para el valor de EBITD medido, muy superior a lo a los rangos encontrados en otros contratos en Chile (2) el espesor utilizado es insuficiente para resistir las cargas por el paso del tráfico, para esas condiciones climáticas.

Tabla 7. Comparación del Diseño M-E PDG y AASHTO 1998

	M-E PDG		AASHTO 1998
K-Suelo	120 MPa/m		
Archivo Climático	<i>Palmdale-California</i>		
Alabeo Construcción	-6°C	-25°C	-----
Dimensiones de las losas (cm)	400x350		
Espesor del hormigón (cm)	22	37	22
Serviciabilidad	10% losas agrietadas	10% losas agrietadas	4.5-2.5 (P _r -P _i)

Para minimizar el efecto del alabeo de construcción real de proyecto y evitar así problemas de agrietamiento, desde el punto de vista del diseño y en otros tramos de la misma ruta, el Ministerio de Obras Públicas optó por rediseñar la geometría de las losas con el fin de

reducir el efecto del alabeo, según muestra la tabla 6 los efectos de reducir el largo de la losa de 4,5 metros a 3 metros, en función del esfuerzo de tracción máximo. Finalmente, para el tramo en estudio, como ya existían losas construidas sin agrietamiento se optó por redimensionar las losas utilizando la tecnología TCP®, donde las dimensiones de las losas finales fueron de 2,25 m de largo por 1,75m de ancho, manteniendo el espesor (12) y (13). El desempeño del camino mejoró considerablemente, sin signos de deterioro estructurales en la actualidad, como se ve en la Figura 5.



Figura 5. Ruta 78 Losas cortas de 2.00m x 1.75 m en un sector con alto alabeo de construcción.

3.1- Inputs de Diseño M-EPDG

El desempeño esperado de la ruta 78 también fue evaluado con el M-EPDG y los inputs de diseño correspondientes para cada subtramo se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8. Inputs de Diseño M-E PDG de los diferentes Subtramos.

SUBTRAMO	A	B	C	D
Información General				
Período de Diseño (años)	27	24	25	25
Mes de Construcción	Abril 1992	Abril 1995	Abril 1994	Abril 1994
Parámetros de Análisis				
IRI Final (m/km)	3.5	3.5	3.5	3.5
Agrietamiento Transversal (Porcentaje de Losas Agrietadas)	10	10	10	10
Escalonamiento Final(mm)	5	5	5	5
Tráfico				
Promedio Anual de Tráfico Diario Inicial (Ambos Sentidos)	2,305	2,660	2,535	2,535
Número de Pistas	2	2	2	2
Características del Diseño				
Diferencial de Temperatura Equivalente de Alabeo Permanente (°C)	- 11	- 16	- 16	- 16
Espaciamiento entre Juntas(m)	3.5	3.5	3.5	3.5
Índice de Erosión	1	1	1	4
1° Capa JPCP				
Espesor de la Capa (cm)	25.5	25	25	25
Coefficiente de Expansión Térmico (°C ⁻¹)·10 ⁻⁵	1	1	1	1
Tipo de Agregados	Granito	Granito	Granito	Granito
Retracción final a 40% H.R. (micrones)	704	704	704	704
Módulo de Elasticidad a 28 Días (MPa)	30,286	30,286	30,286	30,286
Módulo de Ruptura medido a 28 días (MPa); Pfeiffer et al. 1996	4.75	4.75	4.75	4.75
20 años/28 días índice de crecimiento del Módulo de Ruptura	1.25	1.25	1.25	1.25
Base				
Clasificación AASHTO del Suelo	A-1-a	A-1-a	A-1-a	A-1-a
Espesor (cm)	15	15	15	15
Módulo Resiliente (MPa)	276	276	276	276
Subrasante				
Clasificación AASHTO del Suelo	A-5	A-5	A-5	A-5
Módulo Resiliente(MPa)	138	55	77	55

Para utilizar el método de diseño M-EPDG es necesario seleccionar alguna estación climática de EEUU, que sea lo más similar posible al lugar en que se encuentra el proyecto. En el lugar de emplazamiento del proyecto se caracterizaron dos zonas climáticas. En cada una se selecciono una estación que se ubique en la misma latitud que la zona del proyecto para simular el efecto del ángulo del sol y la información climática de esa estación fue cambiada por la información climática de una segunda estación, que tuviera parámetros climáticos similares a la ubicación del estudio. Esta combinación fue utilizada para las corridas del M-EPDG en los diferentes subtramos.

- Los Subtramos A y B se encuentran a las cercanías de Melipilla; se seleccionó la estación Blythe, CA debido a su latitud y la estación San Jose, CA para obtener los datos climáticos.
- Por su parte los subtramos C y D se encuentran en una zona climática costera, la que es bien representada con la ciudad de Santo Domingo. La estación de Santa Ana CA, fue la escogida por latitud y Monterey, CA por datos climáticos.

3.2- Resultados de M-E PDG

Los resultados de desempeño del M-EPDG de los cuatros subtramos se muestran en las Figuras 6 a 8 en términos de IRI, escalonamiento promedio y porcentaje de losas agrietadas respectivamente. Cada figura contiene los resultados con el EBITD medido y el valor por defecto de -6°C . La Figura 6 incluye una curva obtenida por método de diseño AASHTO 1993, obtenida gracias a la siguiente relación IRI-PSI para pavimentos de hormigones chilenos (14):

$$PSI_{AASHTO} = 5.769 - 1.589 \cdot (IRI)^{0.5} \quad (R^2 = 0.943) \quad (3.2.4)$$

Los inputs de diseño utilizados para calcular el espesor de la losa utilizando el método de diseño AASHTO 1993 se muestra en la tabla 9. Los registros de IRI y escalonamiento promedio medidos en la Ruta 78 se incluyen en la Tabla 10.

Tabla 9. Parámetros de Diseño AASHTO 1993 Utilizados

	A	B	C	D
Ejes Equivalentes en Pistas de Diseño	24,080,000	22,710,000	23,180,000	23,180,000
Desviación Éstandar	0.29	0.29	0.29	0.29
Serviciabilidad Inicial	3.76	3.64	3.7	3.7
K Suelo [MPa/m]	69.4	40.8	43.5	33.2
M.R. Medido en Terreno [MPa]	4.75	4.75	4.75	4.75
Módulo de Elasticidad a 28 Días [MPa]	30,286	30,286	30,286	30,286
Coefficiente de Drenaje	1.25	1.25	1.25	1.25
Coefficiente de Transferencia de Carga (J)	3	3	3	3
Espesor Losa de Hormigón [cm]	25.5	25	25	25

Tabla 10. Mediciones de IRI y Escalonamiento en Ruta 78

	IRI (m/Km)						Escalonamiento (mm)			
	2002	2003	2004	2006	2008	2009	2002	2003	2004	2005
Subtramo A		2.3	2.3	2.4	2.5	2.6	2.4	2.6	1.7	1.7
Subtramo B	2.6	2.7	2.8	3.1	3.1	3.1	2.4	2.8	3	-
Subtramo C	2.5	2.5	2.6	2.8	2.9	2.9	2.8	2.6	2.7	-
Subtramo D	2.6	2.7	2.9	3.1	3.2	3.3	3.1	4	3.5	-

La Figura 6. Curvas de IRI obtenidas por M-E PDG y AASHTO 1993 y mediciones realizadas para subtramos A,B,C y D respectivamente en la Ruta muestra una correlación clara entre las mediciones de IRI y las curvas del mismo parámetro de desempeño obtenido por M-EPDG usando el EBITD medido en terreno. Usando el valor estándar de EBITD (-6°C) en el M-E PDG, la rugosidad obtenida es considerablemente menor. La curva AASHTO 1993 obtenida mediante correlación IRI-PSI (11) es bastante similar a la curva por defecto del M-EPDG. Dado que el método AASHTO 1993 no considera el alabeo de construcción como parámetro de diseño, los resultados de este modelo varían considerablemente en la Zona Central de Chile, donde el nivel de EBITD es mediano o alto. La curva de escalonamiento promedio de la Ruta 78 tiene un comportamiento similar a la de IRI. La correlación entre el escalonamiento promedio medido y la curva obtenida con el EBITD medido en terreno es mucho mayor que usando el EBITD por defecto.

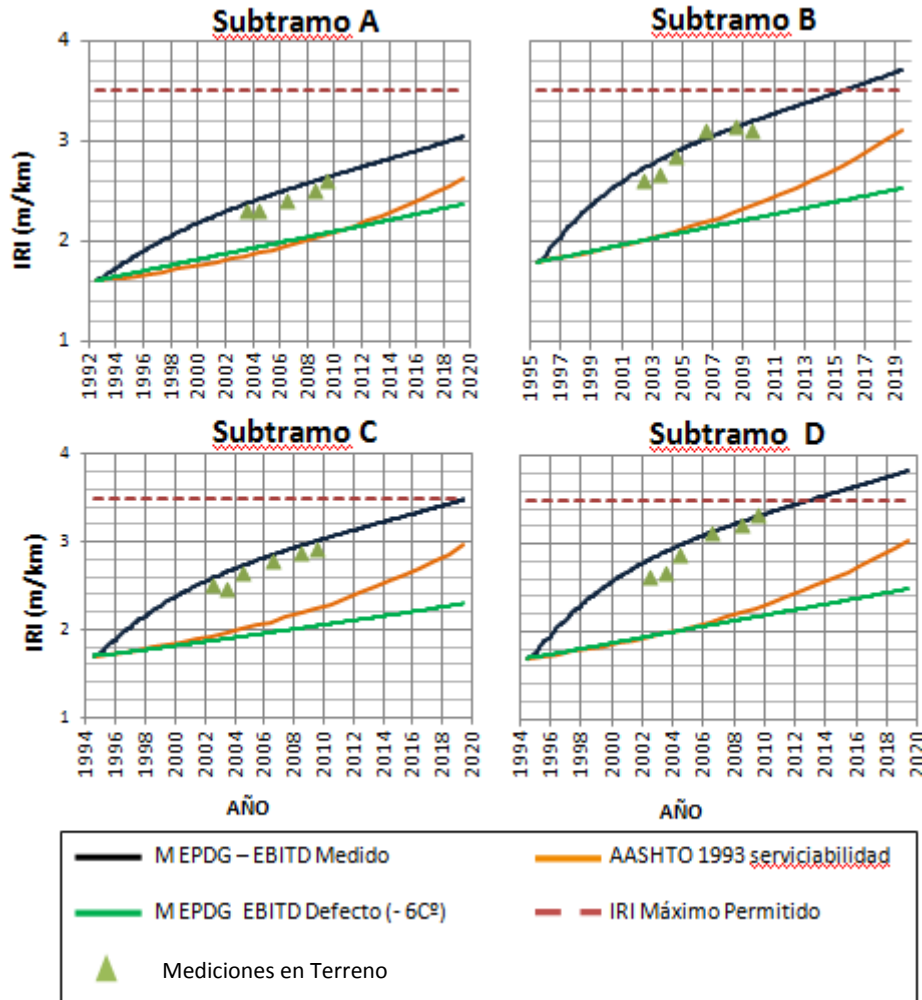


Figura 6. Curvas de IRI obtenidas por M-E PDG y AASHTO 1993 y mediciones realizadas para subtramos A,B,C y D respectivamente en la Ruta 78.

Utilizando el valor de EBITD que viene por defecto en el M-EPDG, el software calcula que no ocurrirá agrietamiento en ninguno de los cuatro subtramos, al final del período de análisis, como se muestra en la figura 8. La empresa concesionaria ha informado que el subtramo D tiene entre 3 y 5 % de las losas agrietadas. Debido a que no existe información respecto del nivel de grietas en el pavimento durante los años de servicio, es que no es posible una comparación entre lo predicho por el modelo de agrietamiento del M-EPDG y lo que ocurrió realmente en el pavimento.

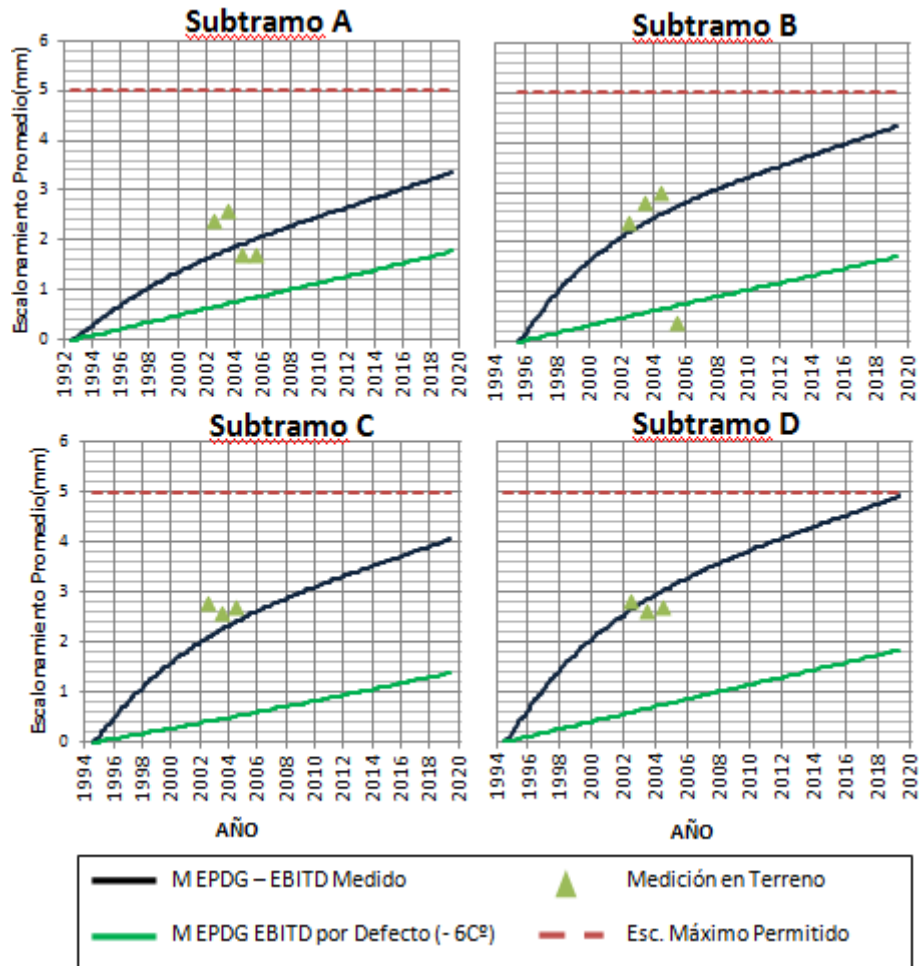


Figura 7. Curvas de Escalonamiento obtenidas por M-E PDG y mediciones realizadas para subtramos A,B,C y D respectivamente en la Ruta 78.

Se realizó un análisis del nivel de agrietamiento hipotético en el pavimento, utilizando el EBITD medido en terreno en cada subtramo. El subtramo A tuvo un EBITD de -11°C y el M-EPDG reportó 0,4% de las losas agrietadas, similar a lo reportado por la Empresa Concesionaria. Sin embargo el subtramo D tiene alrededor de un 5% de las losas agrietadas. Este valor es más cercano a lo que obtiene el M-EPDG el utilizar un EBITD de -16°C como input de diseño que al utilizar -6°C (valor por defecto).

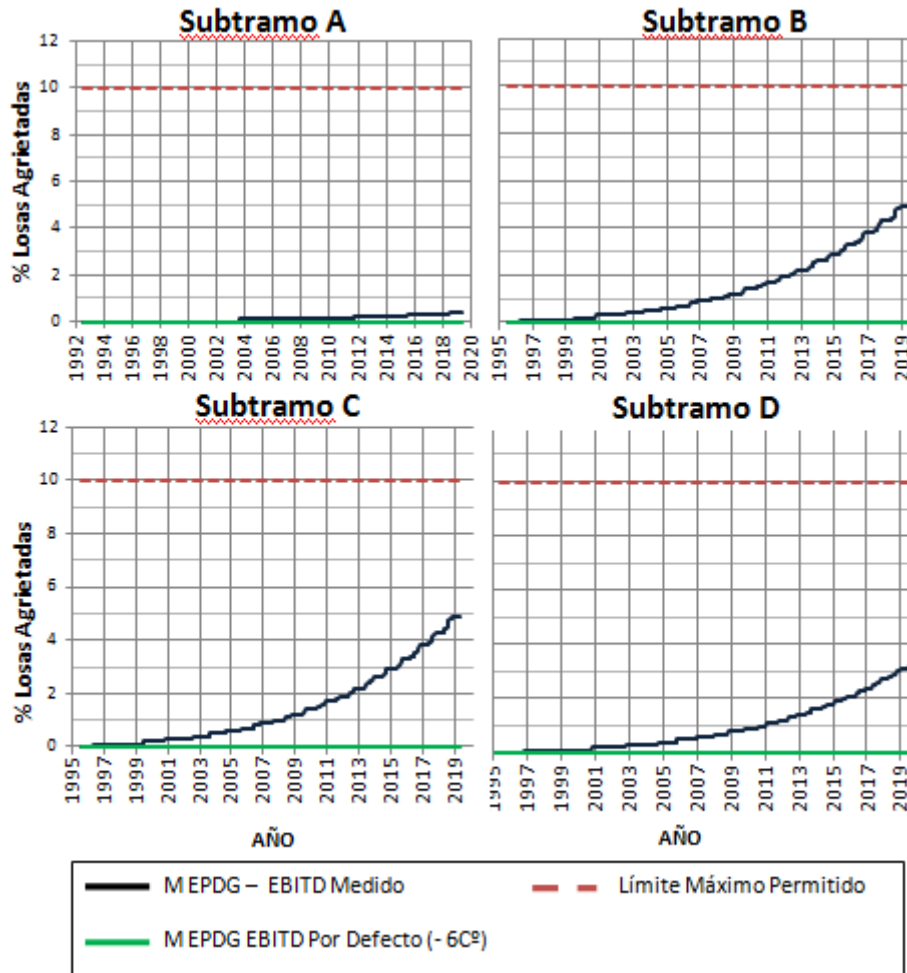


Figure 7. Curvas de Agrietamiento obtenidas por M-E PDG para subtramos A,B,C y D respectivamente en la Ruta 78.

Los mismos subtramos de la ruta fueron re-analizados en dos condiciones de construcción; una más favorable, es decir pavimentación nocturna con un EBITD de -11°C (valor medido en el subtramo A) y otra menos favorable pavimentando de día en época calurosa con un EBITD de -16°C (Valores medidos en los subtramo B,C1 y C2). La figura 9 muestra de forma clara que el desempeño predicho por el pavimento, medido en términos de IRI, escalonamiento y agrietamiento, mejoraron cuando se disminuyo el EBITD. El IRI terminal disminuyo entre 3.65 m/km a 3.05 m/km mientras el escalonamiento terminal disminuyó de 4,5 mm a 3,0 mm. Finalmente el porcentaje de losas agrietadas fue cercana a 0 con bajo EBITD, mientras que en condiciones desfavorables de pavimentación (EBITD = -16°C) el agrietamiento se encuentra entre 3 y 8%.

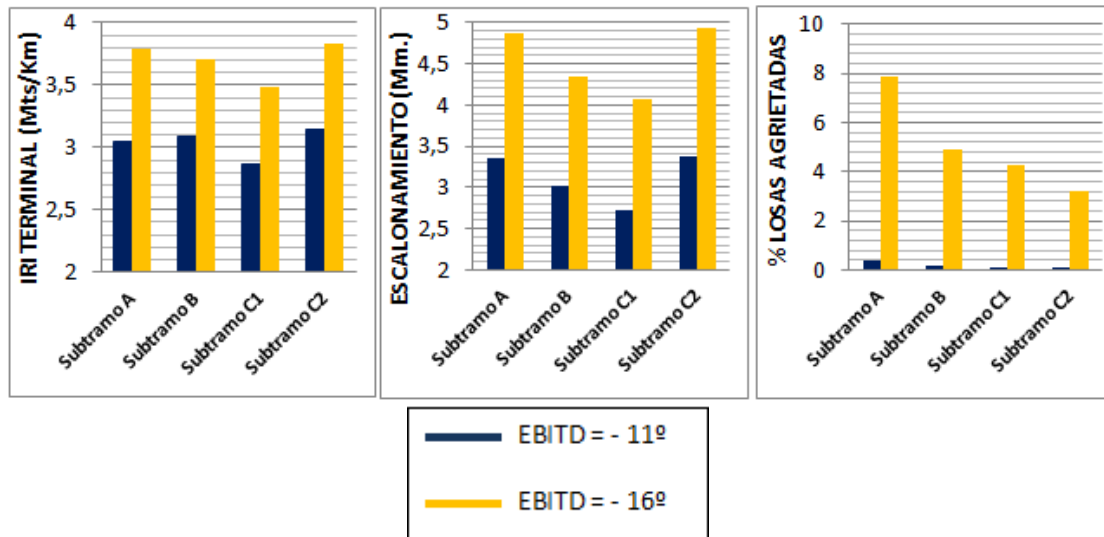


Figura 8. Nivel de agrietamiento y serviciabilidad final del pavimento en función de las condiciones iniciales supuestas de alabeo de construcción.

Se realizaron corridas adicionales en el M-EPDG para comparar el diseño estructural necesario para que el subtramo A de la Ruta 78 tenga un desempeño equivalente a diferente nivel de EBITD (-11°C, -16°C, -25°C). Los dos primeros niveles de EBITD son los obtenidos en el estudio de la Ruta 78 y el de -25°C es el valor medido en la Ruta 60. La Figura 10 muestra la reducción en el espesor necesario de la losa para varios modos de falla, cuando el hormigón es construido con menores niveles de alabeo de construcción. Con -11°C de EBITD y un espesor de losa de 25,5 cm, el IRI terminal fue de 3.05 m/km, el escalonamiento promedio fue de 3.35 mm, y el porcentaje de losas agrietadas de 0.4%. Estos valores fueron comparados con el desempeño esperado a otros dos niveles de EBITD (-16°C y -25°C). Como era de esperarse, un espesor mayor fue necesario para contrarrestar el efecto de un mayor alabeo de construcción. Para un EBITD de -16°C, se necesitan 28,5 cm de espesor para tener un IRI y escalonamiento final similar a una losa de hormigón de 25,5 cm de espesor y -11°C de EBITD. En términos de porcentaje de losas agrietadas el espesor sube a 29,5 cm, un incremento de hormigón de 15,6%. En caso de que el pavimento sea construido con un valor aún mayor de -25°C, el espesor necesario sube a 31,5 cm (un incremento de 23,5%) para un desempeño similar en términos de agrietamiento de las losas. Finalmente en términos de IRI y escalonamiento, el espesor necesario sube a 33 cm.

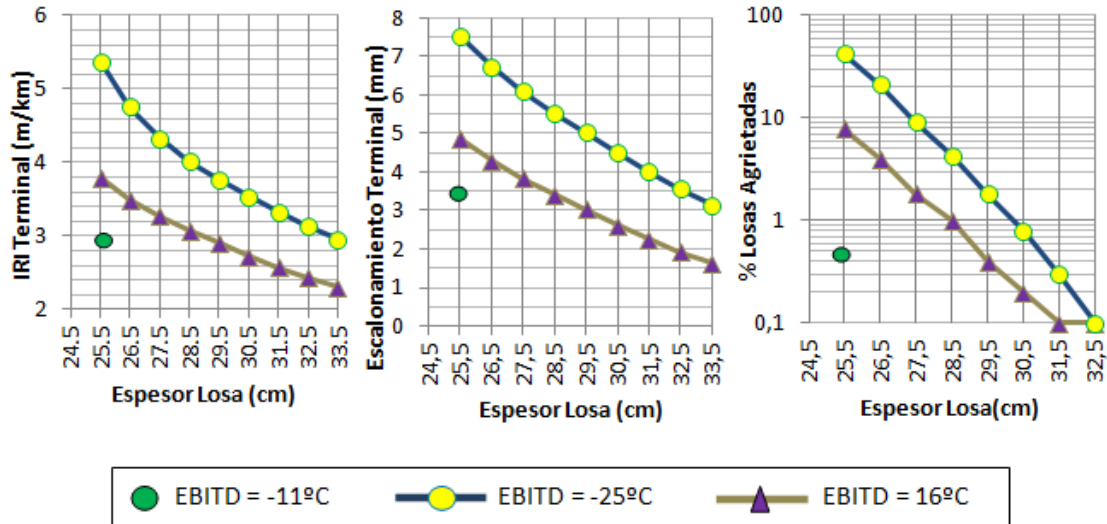


Figura 9. Espesor necesario para que la losa tenga un desempeño similar en términos de IRI, escalonamiento y Agrietamiento de las losas a diferentes niveles de EBITD.

Las Figuras 6 a 10 permiten entender desde un punto de vista cuantitativo, la importancia de prácticas de curado, las condiciones ambientales al momento de la colocación y el diseño estructural del hormigón. El EBITD puede ser minimizado si se reduce el gradiente térmico al momento de la colocación del hormigón y la reducción de la pérdida de humedad en la superficie superior de la losa de hormigón. La selección de los materiales, procedimientos técnicos constructivos y variables climáticas son aspectos de gran importancia en el nivel de EBITD que tendrá un cierto pavimento. Las condiciones climáticas en el momento de la pavimentación es el factor más relevante en el desempeño de un pavimento. Altas temperaturas, viento fuerte, alta radiación solar y baja humedad ambiente son factores que hay que considerar en los procedimientos constructivos y en el momento en que se realiza la pavimentación.

4.- Conclusiones

El método de diseño AASHTO 1993 y 1998 para pavimentos rígidos no considera el alabeo de construcción, como input de diseño, a diferencia de la nueva guía de diseño empírica mecanicista, que utiliza un valor por defecto de -6°C .

Se realizó un estudio para medir el alabeo de construcción (EBITD) y ver el desempeño en distintos proyectos de pavimentos de hormigón en Chile y comparar con las predicciones del M-E PDG. El EBITD fue medido a través de dos métodos diferentes, en la ruta 60 Ch y 78. El EBITD medido en Chile vario entre -11°C y -41°C dependiendo de la ubicación geográfica, principalmente de el momento en que se pavimentó y de las practicas constructivas utilizadas. Es importante mencionar que el valor determinado para la ruta 60 Ch (-41°C) es muy superior a los rangos esperados ($-19,2^{\circ}\text{C}$, Poblete 1988), razón por la cual el deterioro fue casi inmediato. El EBITD en todos los casos fue considerablemente mayor que el valor por defecto del M-E PDG (-6°C). El proyecto con mayor EBITD mostró un nivel de agrietamiento importante luego de una semana de apertura al tráfico, mientras que el otro proyecto mostró niveles de IRI, escalonamiento y agrietamiento mayor a niveles de EBITD mayor. Se necesitan losas con un espesor mayor para regiones con un alto nivel de EBITD. En el futuro, los diseños de pavimentos de hormigón en Chile, deberían considerar magnitudes reales de EBITD como parámetros de diseño. El uso de losas cortas (2.25 m x 1.75 m) puede ser una solución para minimizar el efecto del alabeo de construcción y evitar fallas prematuras.

Para minimizar el alabeo de construcción se deben mejorar las prácticas de pavimentación, poniendo énfasis en: la hora en que se pavimentará, la temperatura del hormigón y las protecciones necesarias para el curado del hormigón. Estas recomendaciones ya han sido consideradas en los últimos contratos del MOP como parte de las especificaciones técnicas especiales.

5.- Referencias

- 1.- Larrain , Claudio, C. “*Análisis Teórico-Experimental del Comportamiento de Losas de Hormigón de Pavimentos*”, MSc Thesis, School of Engineering, Catholic University of Chile, 1985, 280 pp.
- 2.- Poblete, M., Salsilli, R., Valenzuela, R., Bull, A. And Spratz, P. (1988). “*Field Evaluation of Thermal Deformations in Undoweled PCC Pavement Slabs.*” Trans. Res. Rec., 1207, 217-228.
3. - Bordelon, A., Roesler, J.R., and Hiller, J.E., “*Mechanistic-Empirical Design Concepts for Jointed Plain Concrete Pavements in Illinois*”, Final Report, FHWA-ICT-09-052, Illinois Center for Transportation, University of Illinois, Urbana, IL, July 2009, 255 pp.
- 4.- Rao, Shreenath, Roesler , Jeffery. (2005) “*Nondestructive Testing of Concrete Pavements for Characterization of Effective Built-In Curling*” ASTM International, West Conshohocken PA.
- 5.- Binder Echeverria, Carlos, Covarrubias Juan Pablo, “*Estudio Mecanico-Empirico del Estado Actual de Un Tramo De Pavimento De Hormigón*”. 2010
- 6.- American Association of State Highways and Transportation Officials (1993). “*AASHTO Guide for Design of Pavement Structures*”, Washington, D.C.
- 7.- American Association of State Highways and Transportation Officials (1998). “*Supplement to the AASHTO Guide for Design of Pavement Structures*”, Washington, D.C.
- 8.- NCHRP (Marzo 2004). *Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures. Final Report for Project 1-37A, Part 1, 2 & 3, Chapter 4.* National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C.
- 9.- Byrum, C.R. (2000). “*Analysis by High Speed Profile of Jointed Concrete Pavement Slab Curvatures*”, Transportation Research Record 1730, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp. 1-9.
- 10.- Vandebossche, J.M. (2003). Interpreting Falling Weight Deflectometer “*Results for Curled and Warped Portland Cement Concrete Pavements*”. Ph.D. Thesis. University of Minnesota, Minneapolis, Minnesota.
- 11.- Yu, H.T., and L. Khazanovich (2001). “*Effects of Construction Curling on Concrete Pavement Behavior,*” Proceedings of the 7th International Conference on Concrete Pavements, Orlando, FL, Vol. 1, pp. 55-68.
- 12.- Covarrubias, J.P, Roesler, J., and Covarrubias, J. P. (2010), “*Design of Concrete Slabs with Optimized Geometry,*” 11th International Symposium on Concrete Roads, October 20-22, Sevilla, Spain.
- 13.- Covarrubias V, Juan Pablo (2009). Optipave V 3.0.
- 14.- De Solminihac T., Hernán, Salsilli, Ricardo, Kohler , Erwin and Bengoa, Elva (Octubre 2003) “*Analysis of Pavement Serviceability for the AASHTO Design Method: The Chilean Case*” The Arabian Journal for Science and Engineering, Volume 28, Number 2B.

15.- Hansen, W., Smiley, D. L., Peng, Y., and Jensen, E. A. (2002) “*Validating Top-Down Premature Transverse Slab Cracking in Jointed Plain Concrete Pavement.*” Transportation Research Record 1809, 52–59.

16.- Khazanovich, Lev, Tayabji Shiraz D., and Darter , Michael I. (2001). “*Backcalculation of Layer Parameters for LTP Test Sections, Volume I: Slab on Elastic Solid and Slab on Dense-Liquid Foundation Analysis of Rigid Pavements*”.

17.- Pfeiffer , Horacio; Agurto, Alfonso (1996). *Control de Calidad de los Hormigones de Pavimentos*, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Civil.