

Efecto de la temperatura en pavimentos de hormigón no armado de la Instrucción 6.1-IC y su afección a la regularidad longitudinal



Effects of Temperature on Jointed Plain Concrete Pavements of the 6.1-IC Standard, and its Reflection on Roughness

Jesús Díaz Cuevas

*Dr. Ingeniero de Materiales e Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.
Isolux Corsan.*

Resumen

En este artículo se analiza el efecto de la temperatura en la curvatura de las losas de pavimentos de hormigón no armado. Los diferentes gradientes térmicos provocan tensiones cíclicas que afectan a la durabilidad de las losas. La curvatura afecta a los resultados del IRI, los cuales tendrán valores diferentes según el momento del día en el que se produzca la medición. En este artículo se analiza la sección 214 de la Instrucción 6.1-IC, de 23 cm de espesor, con una longitud de losa variable de 4 y 5 m, sometida a una diferencia de temperatura entre la parte superior e inferior de la losa de -5 y 5 °C. Estudiando el comportamiento tensional de las losas, de los pasadores transversales así como la repercusión que tendrían las deflexiones en el valor del IRI.

Abstract

This paper analyzes the effect of temperature on the curvature of the slabs of jointed plain concrete pavements. Thermal gradients cause cyclical stresses that affect the durability of slabs. The curvature affects the results of IRI, which have different values depending on the time of day in which measurement takes place. This article analyzes the section 214 of the 6.1-IC standard, 23 cm thick. With a length of 4 to 5 m variable slab, subjected to a difference in temperature between the top and bottom part of the slab from - 5 to 5 °C. Studying the behavior of tension slabs, of dowel bars and the impact of deflections on the value of IRI.

1. Introducción

Diversos autores han estudiado el efecto de la temperatura y humedad en la curvatura de las losas (curvatura y alabeo). Sin embargo no todas las instrucciones contemplan estas variaciones de cara a la unidad terminada. Es así que, por ejemplo, el PG-3 en su artículo 550 contempla el efecto térmico solamente para la duración del curado, pero no lo tiene en cuenta para la unidad terminada y medición del IRI.

Parte de los efectos debidos a los cambios de humedad en la mezcla se pueden paliar en la ejecución o en el diseño de la mezcla de hormigón, evitando además otras patologías, como las fisuras por secado.

El efecto térmico en la curvatura de las losas de los pavimentos de hormigón no armado puede ser muy acusado en zonas con climas continentales. En este artículo se pone de relieve este aspecto. Y para ello se establece la simulación de un pavimentos de hormigón no armado y longitudes de losa de 4 y 5 m. Este firme atiende a la sección 214 de la Instrucción 6.1-IC, estableciendo dos gradientes térmicos de -5 y 5 °C entre la parte superior de la losa y la inferior, y analizando las deflexiones y tensiones que se producen y su afección al IRI.

La distribución de temperaturas entre la parte superior e inferior de la losa de hormigón del pavimento es no lineal [1]. Sin embargo, los autores *Rao and Roesler* [5] establecieron un valor como suma de los cinco factores que afectan al comportamiento de la losa. Un gradiente efectivo lineal asociado a la temperatura. Estos indicadores serían:

- La diferencia de temperaturas entre la parte superior de la losa y la base (tg) debido a los cambios de temperatura a lo largo del día.
- Diferencia de humedad en el espesor de la losa (mg).
- Gradiente térmico durante el curado de la losa (bi).
- Efecto de contracción por secado (shr).
- El efecto de la fluencia (crp).

$$\Delta T_{total} = \Delta T_{tg} + \Delta T_{mg} + \Delta T_{bi} + \Delta T_{shr} + \Delta T_{crp}$$

Todos los componentes anteriores afectan en mayor o menor medida al alabeo de la losa. Pero el gradiente térmico ΔT_{tg} es uno de los factores que más influye a dicho efecto. En las zonas donde los cambios térmicos son acusados entre el día y la noche este fenómeno es más evidente, provocando deflexiones cíclicas en la losa. Cuando el gradiente térmico es positivo, es decir, cuando la temperatura de la parte superior de la losa es mayor que la temperatura de la parte inferior, se produce un efecto convexo. Por el contrario, si el gradiente es negativo el efecto es inverso.

Las componentes térmicas de diferencia de humedad ΔT_{mg} a lo largo del espesor de la losa, el gradiente térmico durante el curado ΔT_{bi} y el efecto de contracción por secado ΔT_{shr} , tienen una afección más temporal y pueden paliarse, en cierta medida, mediante controles o protecciones durante la ejecución de los pavimentos. Normalmente las losas ejecutadas durante el día tienden a terminarse con curvatura cóncava debido al descenso de temperatura que se va produciendo a lo largo del día.



Figura 2. Alabeo negativo de losas, Aeropuerto Sheremetyevo (Moscú, 2015)

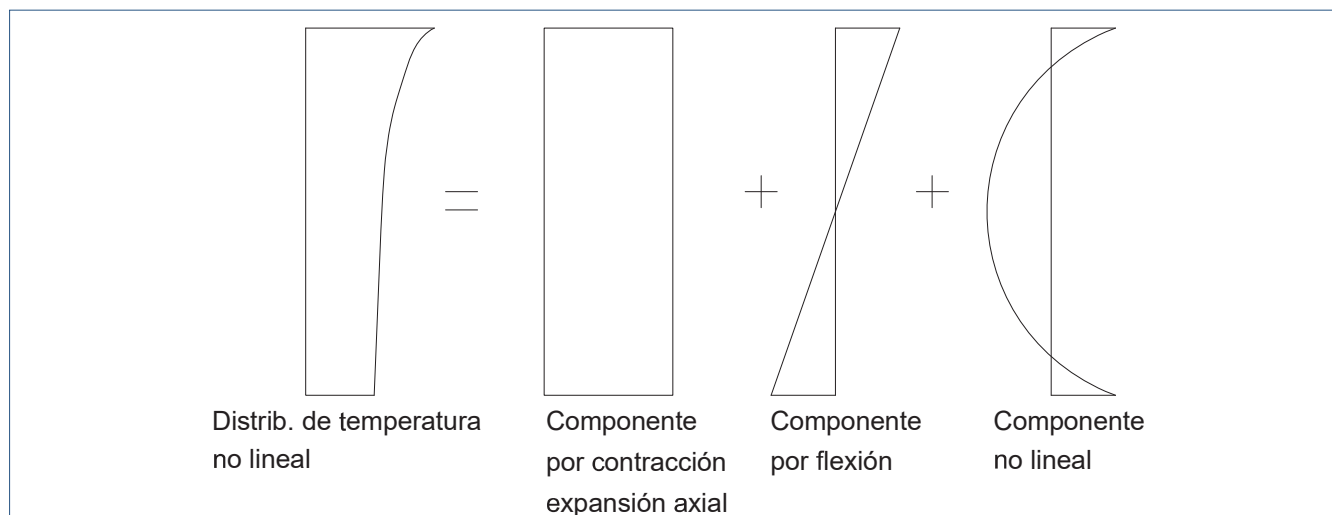


Figura 1. Distribución no lineal de la temperatura en el espesor de losa.

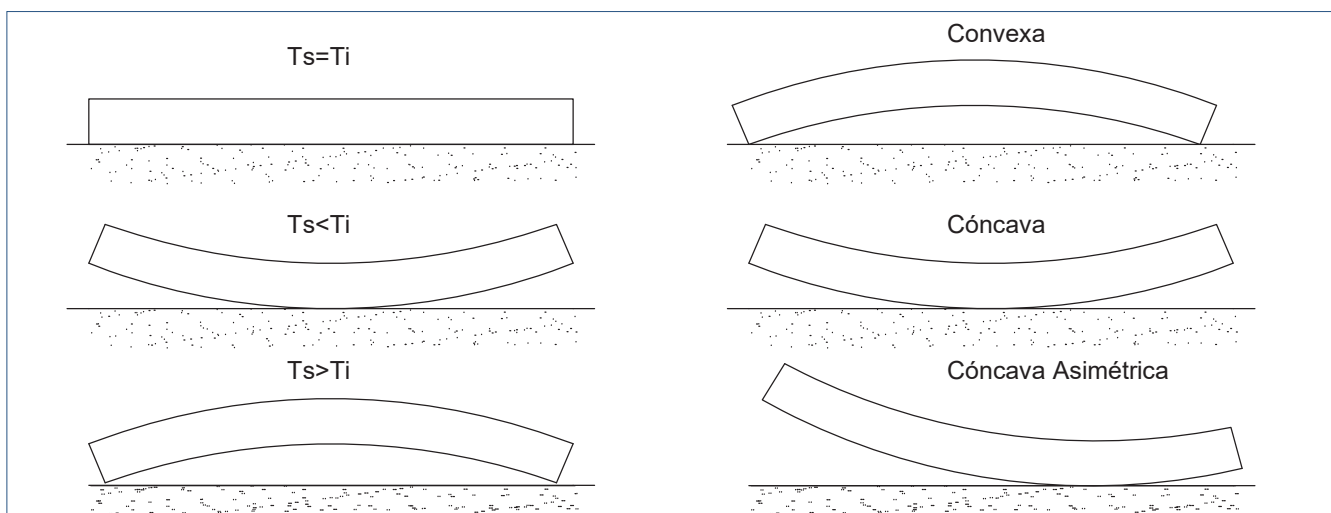


Figura 3. Alabeo de la losa según gradiente térmico (Neeraj Buch et al. 2004)

Estos efectos de alabeo cíclico con tensiones inferiores a la resistencia a flexotracción del pavimento conllevan a la fatiga del pavimento y a la aparición de microfisuras [6].

El control durante las primeras horas es importante con el fin de, no ya de paliar las deformaciones en la losa, sino de evitar fisuras por desecación, siendo importante atender adecuadamente a las condiciones climáticas durante los primeros días. El uso de herramientas informáticas como HIPERPAV facilita la predicción en el comportamiento de la losa diseñada frente a las condiciones climáticas en las primeras 72 horas, y así predecir las tensiones que puedan provocar fisuración, adelantando el aserrado de las juntas.

Cuando el alabeo es negativo las mayores tensiones se producen en la parte superior de la losa y cuando es positivo es la fibra inferior la que soporta mayores tensiones. Esta variación de tensiones provoca la fatiga en el pavimento.

La influencia climática, temperatura y humedad, conllevará a este alabeo que será más o menos acusado según otros factores como son: longitud y ancho de losa, espesor de la misma, módulo elástico de los materiales, coeficiente

térmico de los mismos, módulo de reacción de la base, transferencia de carga entre los pasadores, densidad y coeficiente de Poisson.

La deformación por gradiente térmico viene indicada por la expresión siguiente.

$$\epsilon_t = \alpha \cdot \Delta T \quad (1)$$

ϵ_t = deformación por gradiente térmico.

α = coef. dilatación térmica del material ($^{\circ}\text{C}^{-1}$).

ΔT = gradiente térmico entre la parte inferior y superior de la losa ($^{\circ}\text{C}$).

Las tensiones máximas producidas por efecto térmico fueron estudiadas por Wastergaard en 1927 y posteriormente por Bradbury en 1938. La expresión que determina la máxima tensión por una distribución lineal de temperaturas en el espesor del pavimento es la indicada en la expresión (2).

$$\sigma = \frac{E \cdot \alpha \cdot \Delta T}{2 \cdot (1 - \nu^2)} (C_x + \nu \cdot C_y) <> \sigma = \frac{C \cdot E \cdot \alpha \cdot \Delta T}{2 \cdot (1 - \nu)} \quad (2)$$

σ = tensión por efecto térmico (MPa).

E = módulo elástico del material (MPa).

ν = coef. de Poisson

ΔT = gradiente térmico entre la parte inferior y superior de la losa ($^{\circ}\text{C}$).

C_x, C_y = factores de corrección de Bradbury relacionados con la L/I , siendo L la longitud de losa y I el radio de rigidez relativa; suele establecerse $C_x = C_y = C$.

$$C = 1 - \frac{2 \cdot \cos(\lambda) \cdot \cosh(\lambda) \cdot (\tan(\lambda) + \tanh(\lambda))}{\sin(2\lambda) + \sinh(2\lambda)} \quad (3)$$

$$\lambda = \frac{L}{I\sqrt{8}} \quad (4)$$

$$I = \sqrt[4]{\frac{E \cdot h^3}{12 \cdot (1 - \nu^2) \cdot k}} \quad (5)$$

h = espesor de losa (mm)

k = módulo de reacción de la base (MPa)

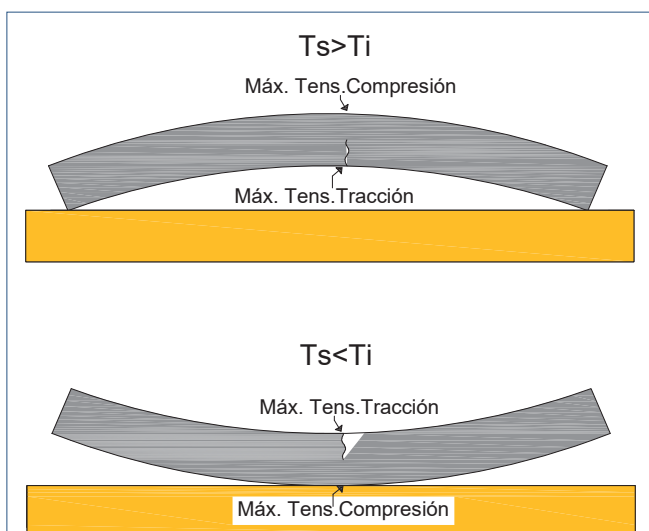


Figura 4. Tensiones máximas en losa por alabeo positivo y negativo (Robert Rodden 2006)

En las expresiones anteriores se puede ver la relación entre los parámetros antes mencionados, longitud de losa, coeficiente de Poisson, módulo de reacción de la base, y las tensiones que se generan. Sin embargo esto sería para una diferencia térmica lineal y en un instante de tiempo concreto; pues existe una variación de las propiedades de los materiales con el tiempo.

En los actuales métodos de cálculo de diversas administraciones americanas se tienen en cuenta en los "input" los parámetros térmicos a los que se someterá la losa.

Las deformaciones conllevan a unas deflexiones que afectan directamente a la medición del IRI. Por tanto la medida del IRI a diferentes horas del día dará lugar a resultados diferentes.

Byrum [9] empleó los datos del estudio LTPP (*Analysis: Factors Affecting Pavement Smoothness*) realizado por la FHWA, *Federal Highway Administration U.S. Department of Transportation* donde se analizaba el alabeo de diferentes pavimentos para obtener un índice de curvatura en las losas. Este índice de curvatura BCI (*Byrum Curvature Index*) representa la curvatura que puede tener un pavimento de hormigón debido a la temperatura, humedad, tipo de material o tipo de junta empleada. También estableció una relación entre la longitud de losa y la curvatura de la misma y su

afección en el IRI. El IRI aumenta linealmente con respecto a la curvatura de la losa y exponencialmente con respecto a la longitud de losa. Esto lo estableció en la expresión siguiente:

$$IRI = 0,5945 \cdot (Curvature\ Magnitude) \cdot e^{0,1595 \cdot (Length\ arc)} \quad (6)$$

Curvature Magnitude $\equiv$ curvatura de la losa en 1000/m

Length arc $\equiv$ longitud de losa entre juntas para losas entre 4 y 8 m.

Otros estudios recientes como el titulado "*Evaluating the effects of concrete pavement curling and warping on ride quality*" efectuado por David K. Merritt et al. (2015) [10] evalúan, además de los cambios térmicos en un día, la variación del IRI en estaciones climáticas diferentes, para las mismas horas del día. Existen otros aspectos que afectan a la regularidad, como son la disposición o no de pasadores transversales y el tipo, daño y escalonamiento de la junta entre losas.

En la figura 5 se muestra la afección que puede tener la curvatura de la losa en la regularidad, establecido en el diagrama RoCK. Los autores Chang et al. [11] establecieron hasta siete modificaciones de este diagrama según el grado de afección de la curvatura a la regularidad en pavimentos de hormigón no armado.

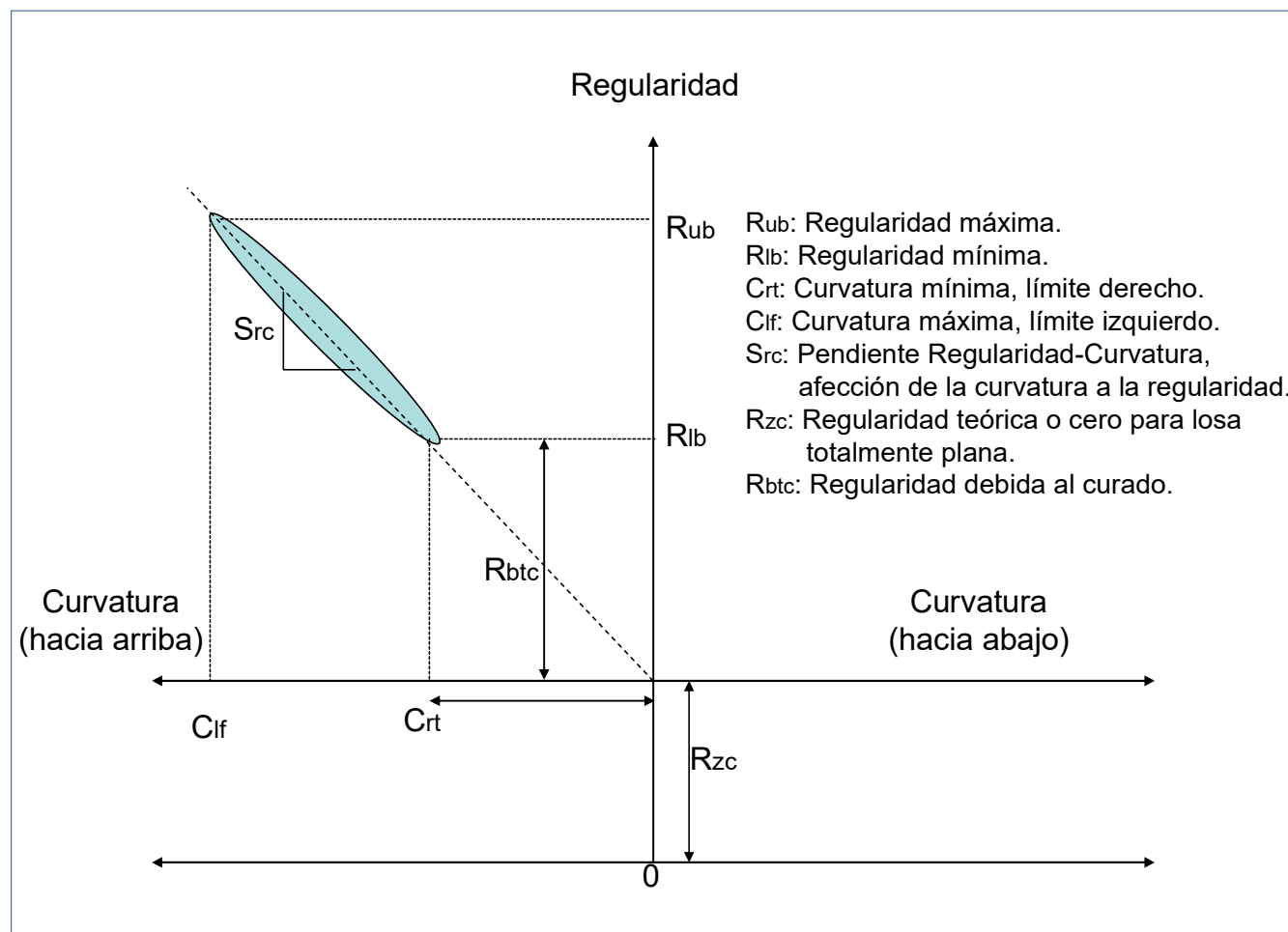


Figura 5. Diagrama "RoCK" que relaciona la curvatura y la rugosidad (Chang G.et al, 2008)

2. Análisis del pavimento

Para analizar la distribución de temperaturas en el espesor de la losa se emplea un software de transferencia de calor, HEAT2, efectuando una simulación por conducción. Estableciendo como condiciones de contorno la temperatura de la parte superior e inferior de la losa, es decir, un gradiente térmico positivo y otro negativo. Estas condiciones de contorno son constantes en el tiempo.

Una vez determinado el espectro de temperaturas que se alcanzan en todo el espesor, se puede confeccionar la curva de temperaturas. Esta curva se establecerá como entrada en un programa de elementos finitos, EverFE, donde se establecerá el análisis del pavimento, determinando las deflexiones y tensiones que se producen sólo por los gradientes térmicos en la losa, según la longitud de la misma, así como los esfuerzos cortantes que se producen en los pasadores. Este análisis determinará qué longitud de losa es más adecuada según en qué zona climática se coloque, así como qué afección tendrá en el valor de IRI.

2.1 Propiedades de los materiales y distribución térmica

Como se ha indicado el firme a analizar corresponde a la sección 214 de la Instrucción 6.1-IC de Secciones de Firme. El espesor de losa de hormigón de pavimento es de 23 cm con una resistencia a flexotracción a 28 días de 4,5 MPa, HP-4,5. Se apoya en una capa de 15 de hormigón magro de resistencia a compresión a 28 días de 15 MPa, HM-15. La subbase está compuesta por capa de zahorra artificial de 20 cm de espesor. El subyacente será una explanada tipo E1 con un valor de módulo de compresibilidad $E_{v2} = 60$ MPa.

Los pasadores transversales estarán compuestos por barras lisas de acero, de 25 mm de diámetro y 50 cm de longitud, del tipo S-275-JR con una separación entre barras de 30 cm. Las barras longitudinales estarán compuestas de acero corrugado B 500 S de 12 mm de diámetro y 80 cm de longitud con una separación entre barras de 1 m.

No se contempla adherencia entre la capa de hormigón de pavimento y la base de hormigón magro. Se establece adherencia entre el resto de capas.

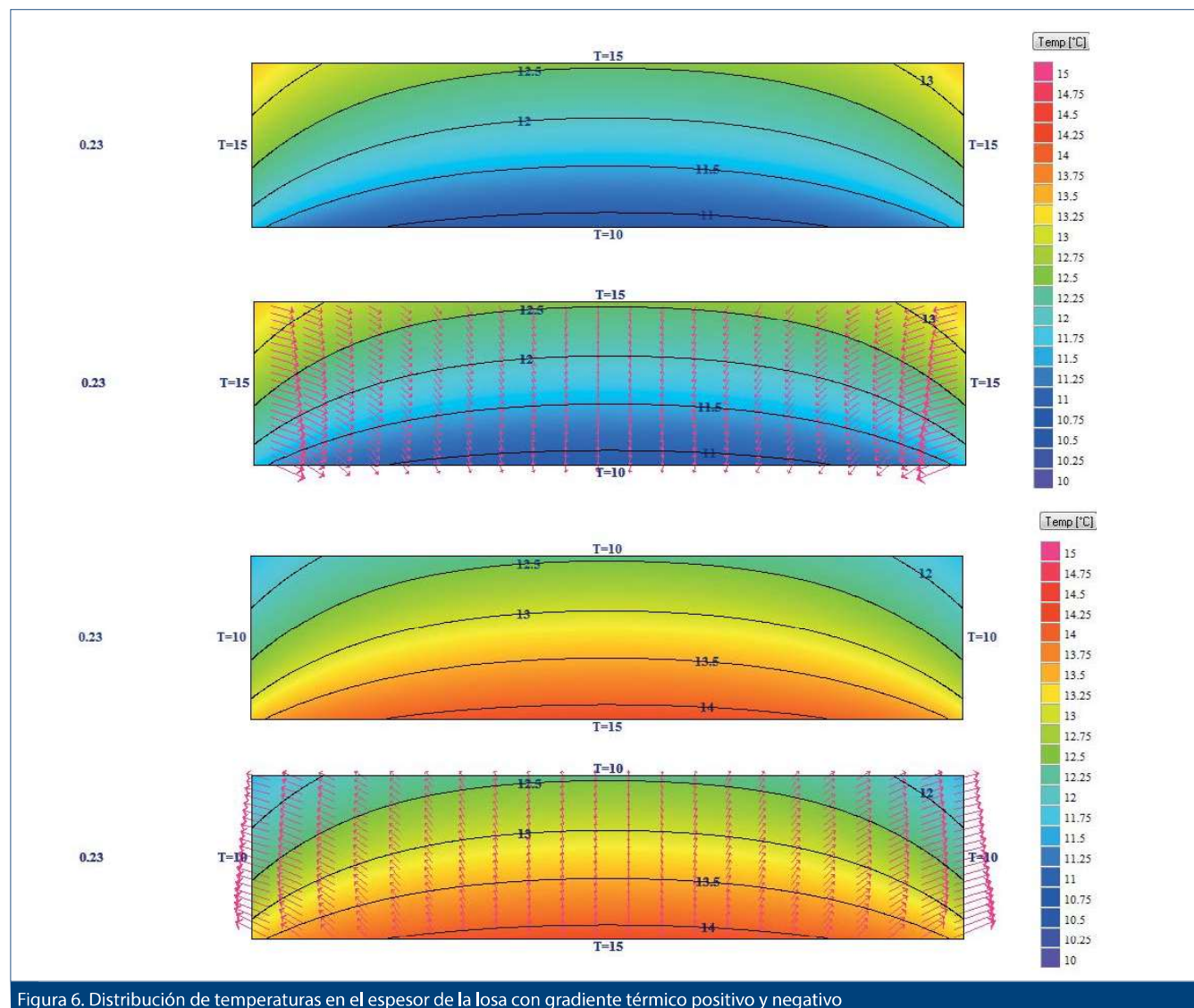


Figura 6. Distribución de temperaturas en el espesor de la losa con gradiente térmico positivo y negativo

En la tabla 1 se establecen las propiedades de los materiales del pavimento a analizar. La expresión (7) de la ACI relaciona la resistencia a flexotracción (MR) y la resistencia a compresión del hormigón (F_c/f_{ck}). Con la expresión (8) de la ACI se obtiene el módulo elástico del hormigón. La expresión (9) relaciona el módulo de compresibilidad E_{v2} con el módulo elástico E.

$$MR = 2,3 \cdot F_c^{\frac{2}{3}} \left(\frac{lb}{in} \right) \quad (7)$$

$$E = 3,32 \cdot f_{ck}^{0.5} + 6,3 \text{ (GPa)} \quad (8)$$

$$E = \pi \cdot (1 - \nu^2) \cdot E_{v2} / 3 \text{ (MPa)} \quad (9)$$

En las figuras siguientes se establece la distribución de temperaturas en el espesor de la losa con un gradiente de temperatura de 5 y -5 °C. La figura 6 muestra la curva de temperaturas en todo el espesor, curva que se empleará en la modelización del firme. Se puede apreciar en el diagrama de flechas de la figura 6 cómo con el gradiente térmico positivo la temperatura va desde los bordes hacia

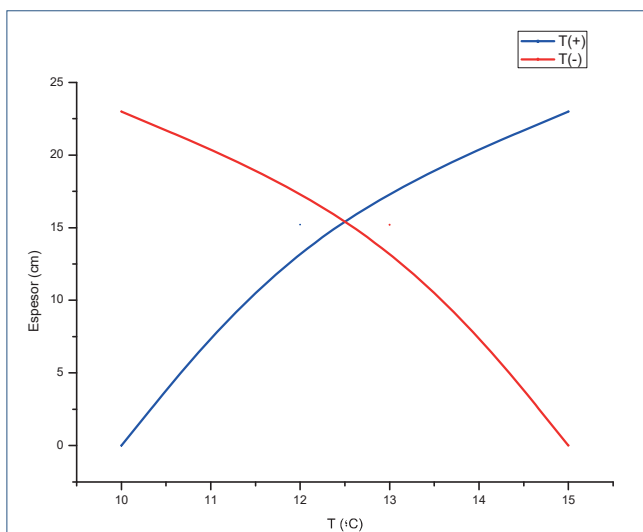


Figura 7. Curva de temperaturas en el espesor de la losa con gradiente térmico positivo y negativo

el interior produciendo el alabeo convexo. Por el contrario con gradiente térmico negativo el efecto es inverso, tal y como indicaba Neeraj Butch et al.

Tabla. 1 Propiedades de los materiales

Material	Densidad ρ (t/m ³)	M. Elástico E (MPa)	C. Poisson ν	C. Específ. C_p (J/Kg*K)	C. Térmica K (W/m*K)	Difusiv. Térmica D (m ² /s)	CTE. α (°C ⁻¹)
HP-4.5	2400	25 400	0,15	880	1,4	$6,92 \cdot 10^{-7}$	$8,5 \cdot 10^{-6}$
HM-15	2400	19 200	0,15	880	1,4	$6,92 \cdot 10^{-7}$	$8,5 \cdot 10^{-6}$
ZA-25	2100	500	0,30	-	-	-	-
E1	1800	55	0,35	-	-	-	-
S-275-JR	7850	210 000	0,30	-	-	-	$1,2 \cdot 10^{-5}$
B 500 S	7850	210 000	0,30	-	-	-	$1,2 \cdot 10^{-5}$

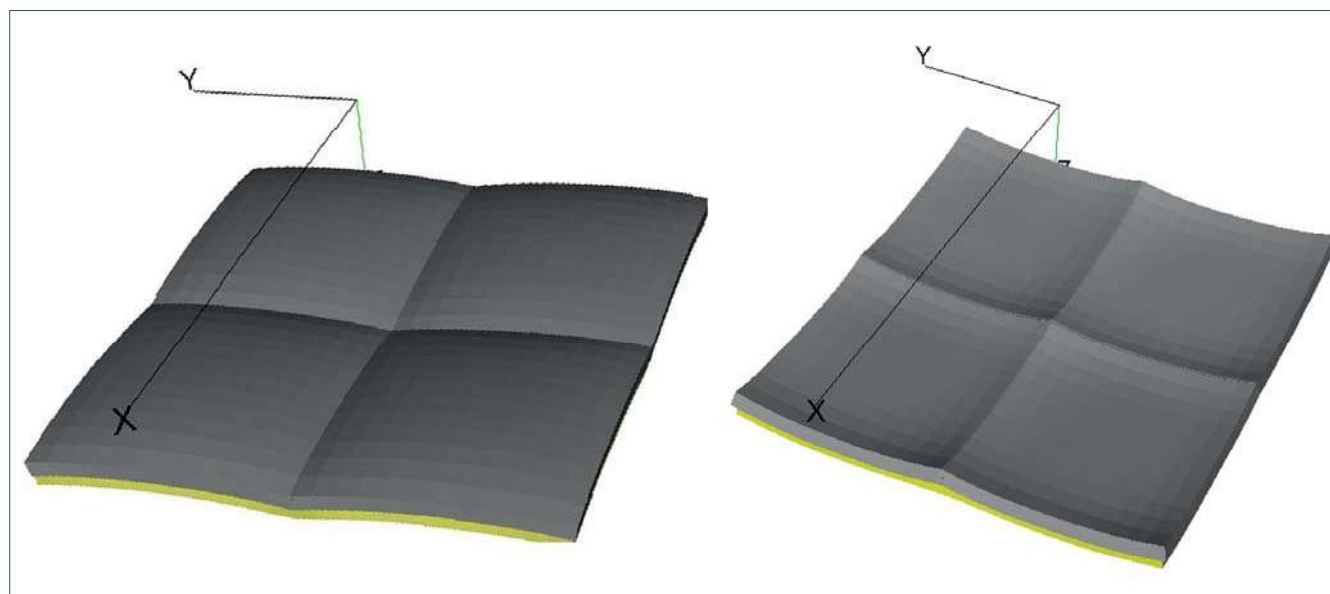


Figura 8. Alabeo en la sección 214 (losa L=4 m) con gradiente térmico positivo (izda.) y negativo (dcha.)

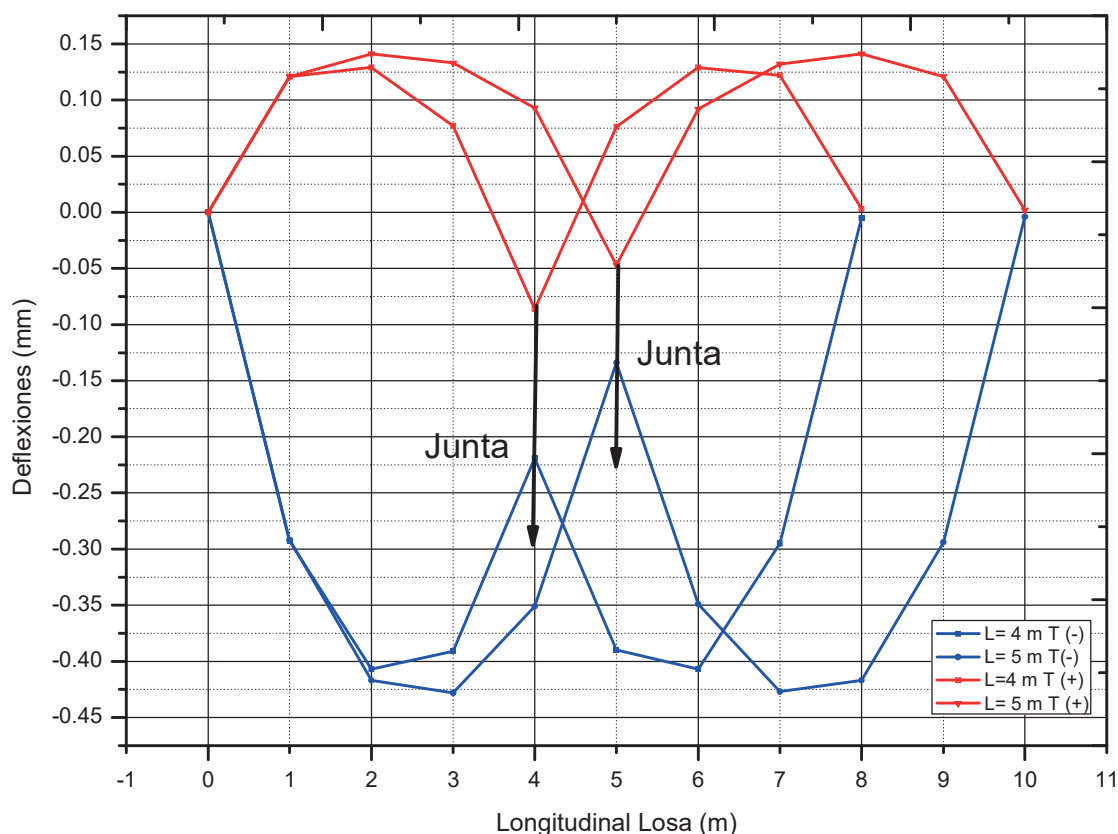


Figura 9. Alabeo en losa de 4 y 5 m con gradiente térmico positivo y negativo

En el análisis no se establece carga debido a ningún tipo de eje, sólo se establecen los gradientes térmicos indicados, analizando así las deflexiones que se producirán en cada losa. La figura siguiente muestra la deformada de las losas de 4 m de longitud ante los gradientes térmicos mencionados.

2.2 Deflexiones y tensiones en el pavimento

En la gráfica de la figura 9 se pueden ver las deflexiones que se producen a lo largo de losa según el gradiente térmico aplicado. En la losa de longitud $L=4 \text{ m}$ la máxima deflexión, para gradiente térmico negativo, es de $|d|=40,7 (10^{-2} \text{ mm})$, y para gradiente positivo es de $|d|=12,9 (10^{-2} \text{ mm})$. Para la losa de longitud $L=5 \text{ m}$ la deflexión máxima, para gradiente térmico negativo, es de $|d|=42,8 (10^{-2} \text{ mm})$, y para gradiente térmico positivo es de $|d|=14,1 (10^{-2} \text{ mm})$. También se puede apreciar la efectividad de los pasadores transversales y por tanto la transferencia de cargas entre losas. Existe una mayor deflexión en las losas de mayor longitud con el mismo espesor; sin embargo, el valor no es muy alto debido al tipo de base. Las mayores deflexiones se producen con el gradiente térmico negativo.

A mayor longitud de losa y espesor constante, el alabeo aumenta con un gradiente térmico negativo hasta una

longitud crítica, donde la deflexión no aumenta, tal y como estudió Eisenmann and Leykauf [7].

Como se ha indicado la importancia del tipo de base y por tanto de su módulo k de reacción también afectará al alabeo, reduciéndose en caso de bases más rígidas.

En este caso no se ha tenido en cuenta la adherencia entre la base y la losa, como ya se indicó. El efecto de adherencia afectará tanto en la cuantía del alabeo como en la simetría del mismo.

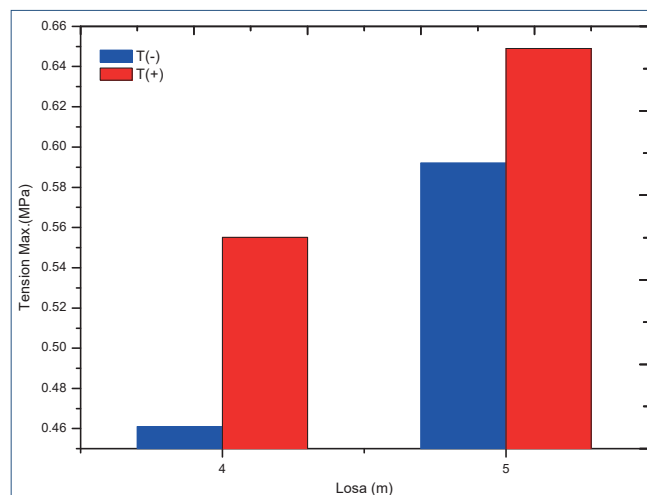


Figura 10. Tensiones máximas en losa de 4 y 5 m con gradiente térmico positivo y negativo

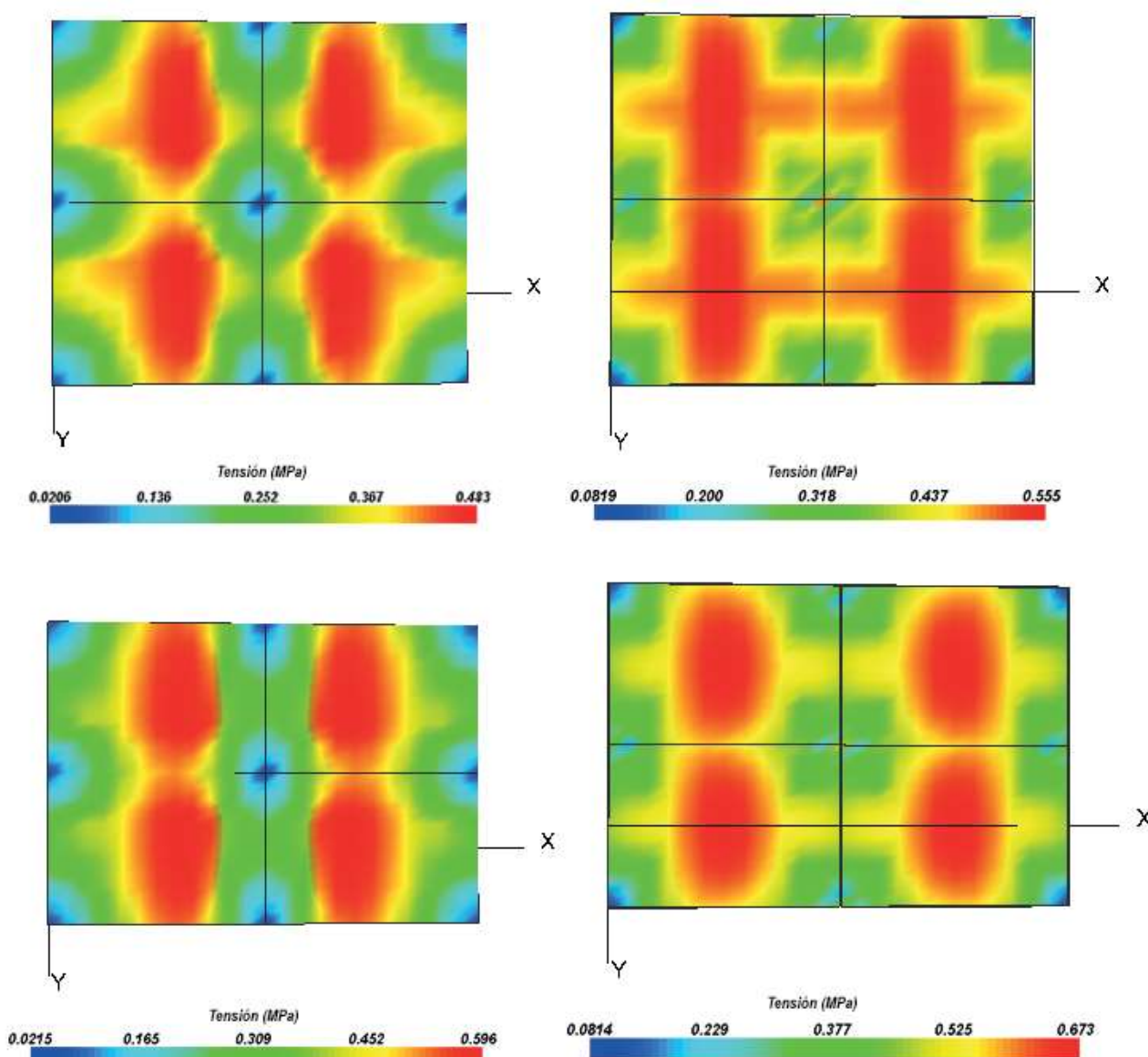


Figura 11. Mapa de tensiones máximas en losa de 4 y 5 m con gradiente térmico negativo (izda.) y positivo (decha.)

Las mayores tensiones que soporta la losa con gradiente negativo se producen en la fibra superior de la sección. Lo contrario ocurre con gradiente térmico positivo. En la figura siguiente se establecen los valores obtenidos para la losa de longitud de 4 y 5 m. En la losa de $L=5$ m se producen mayores tensiones, favoreciéndose, por tanto, la aparición de futuras fisuras. El aumento de tensiones es más acusado en las losas con diferente longitud y gradiente térmico negativo.

En la figura 11 se muestran los mapas de tensiones máximas sobre las losas, según el tipo de gradiente térmico. Puede apreciarse que las tensiones en centro y borde de losa son las más acusadas. También puede apreciarse que la distribución de tensiones en la zona de junta no es semejante, aunque el reparto de pasadores transversales (dowel) sí lo es: por lo que existirá una mayor fatiga en los pasadores donde se reciba una mayor carga.

En la figura 12 se establecen los valores de esfuerzo cortante que soportan los pasadores transversales en las losas con gradiente térmico negativo. Se puede apreciar que los pasadores de las esquinas soportan esfuerzos superiores a los pasadores centrales. El aumento de longitud de losa provoca un aumento en los esfuerzos a cortante.

2.3 Influencia en el IRI.

A continuación se efectúa el análisis de la curvatura de las losas de 4 y 5 m de longitud para los gradientes térmicos indicados. Se establece la medición de las deflexiones en los bordes y centro de losa a lo largo del eje longitudinal.

En la tabla siguiente se establecen los valores de curvatura; se puede apreciar que la curvatura para la losa de longitud 4 m es algo superior a la curvatura de la losa de

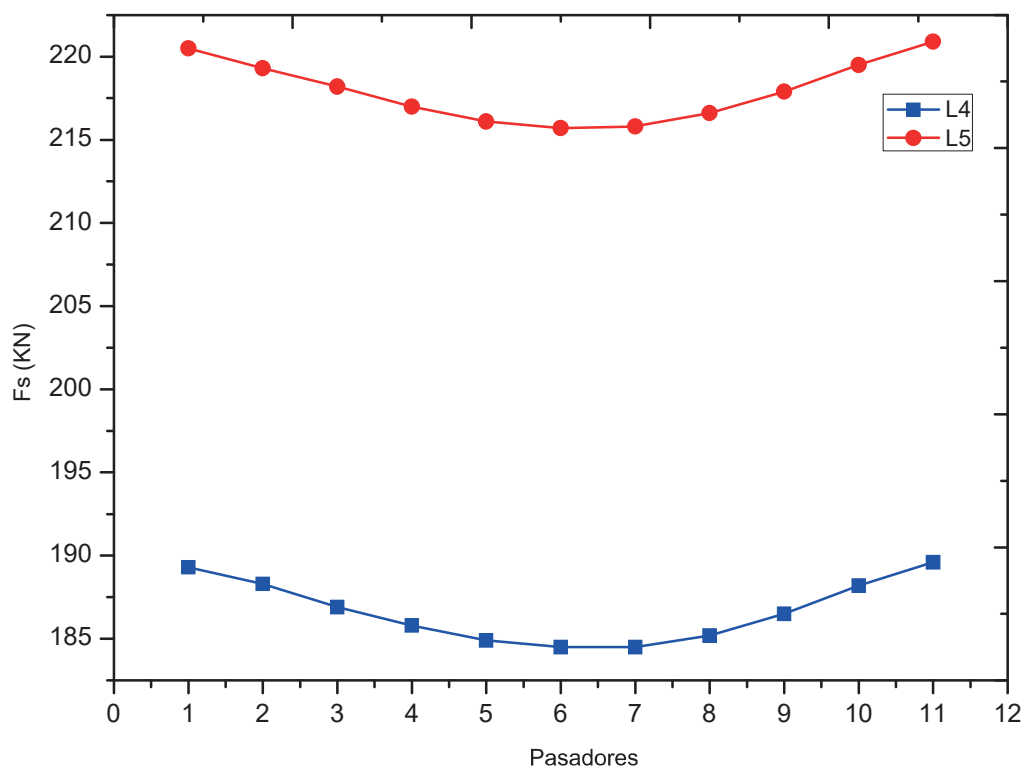


Figura 12. Esfuerzos a cortante en los pasadores de las losas de 4 y 5 m con gradiente negativo

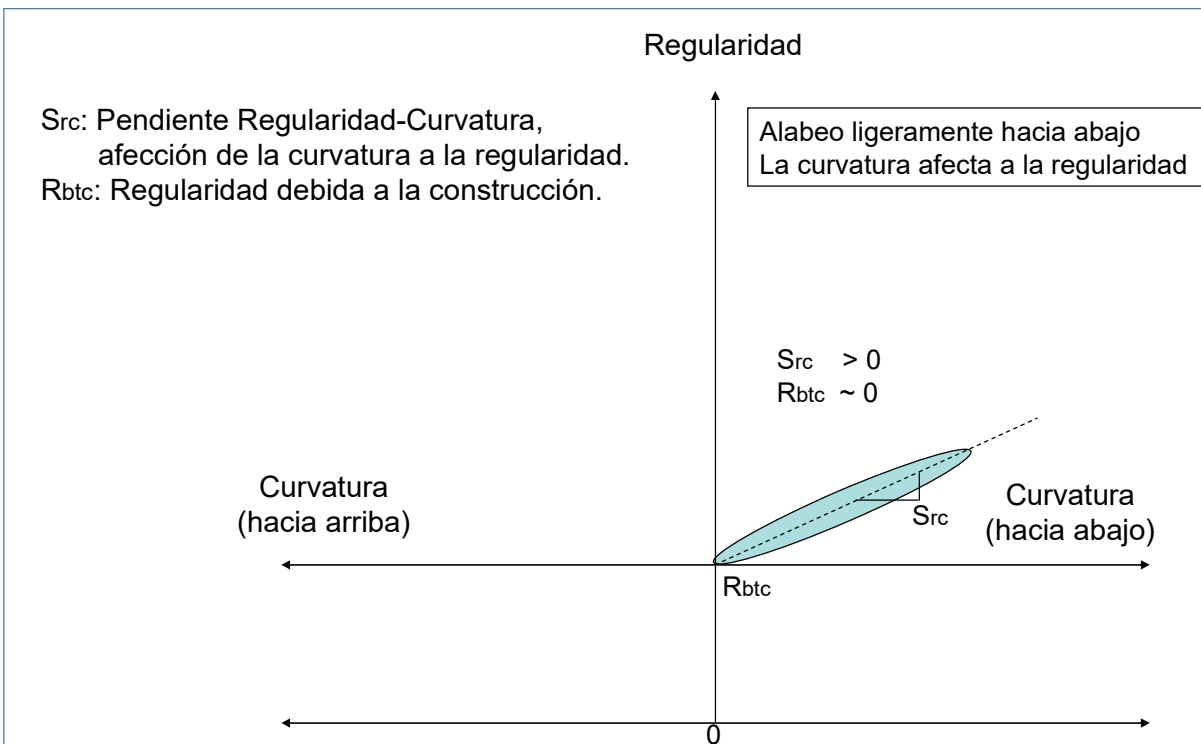


Figura 13. Diagrama "RoCK" que relaciona la curvatura y la rugosidad, caso de baja afección (Chang G.et al, 2008)

longitud de 5 m. En la expresión (6) de Byrum se establece que para un mismo valor de curvatura el valor del IRI aumenta al aumentar la longitud de losa. Aplicando dicha expresión podemos comprobar que los valores de IRI debido al alabeo sería de 0,17 m/km y de 0,16 m/km

para las losas de 4 y 5 m respectivamente. Aproximadamente el 8% del valor máximo permitido para el 100% de los hectómetros según indica el art. 550.7.3 del PG-3. En este caso estaríamos en el caso indicado por Chang et al. mostrado en la figura 5.

Tabla 2. Valores de afección al IRI por efecto térmico

T (-)			
L (m)	Deflex Máx (mm)	Curvatura ΔR (1000/m)	IRI (m/km)
4	1520	0,15	0,17
5	1525	0,12	0,16
T (+)			
L (m)	Deflex Máx (mm)	Curvatura ΔR (1000/m)	IRI (m/km)
4	1395	0,06	0,06
5	1390	0,05	0,07

Para el gradiente térmico positivo los valores son inferiores que para gradiente negativo, obteniéndose valores semejantes y sin afección particular al IRI. En este caso estaríamos en el caso mostrado en la figura 13.

En primer lugar se puede indicar que existe una afección al IRI en función del gradiente térmico. En segundo lugar se establece, que para cada gradiente térmico estudiado, y diferente longitud de losa los valores son muy semejantes, siendo superiores los obtenidos con gradiente térmico negativo sobre los obtenidos con gradiente térmico positivo. Es decir, la disminución de la curvatura de la losa de 5 m tiene un mayor peso en el valor del IRI que la longitud de la misma.

5. Conclusiones

A continuación se establecen las conclusiones más importantes del estudio realizado.

- 1) Se efectúa el análisis del efecto térmico en la sección 214, de pavimento de hormigón, de la Instrucción 6.1-IC; con dos longitudes de losa de 4 m y 5 m, aplicando un gradiente térmico positivo y otro negativo entre la parte inferior y superior de la losa.
- 2) En ambas losas se produce un alabeo positivo y negativo que será de carácter cíclico a lo largo del día, siendo más acusado en zonas con climas más continentales
- 3) El alabeo provoca cambios en las tensiones máximas entre la parte superior e inferior de la losa, siendo más acusadas en las losas de mayor longitud.
- 4) Las deflexiones obtenidas con gradiente térmico negativo son superiores a las obtenidas con gradiente térmico positivo, siendo el alabeo negativo el más perjudicial.
- 5) Los esfuerzos cortantes obtenidos en los pasadores transversales con gradiente térmico negativo son superiores a los obtenidos con gradiente térmico positivo. Los pasadores transversales no soportan los mismos esfuerzos cortantes, siendo los pasadores de las esquinas los que más esfuerzo reciben, pudiendo tener una fatiga mayor.

- 6) Para el firme y gradiente térmico estudiado la curvatura obtenida en las losas de 5 m son algo inferiores a las obtenidas en las losas de 4 m.
- 7) Existe una afección directa entre el alabeo y el IRI, siendo más acusado con gradiente térmico negativo, con un valor de 0.17 m/km para la losa de 4 m. Por lo tanto la hora del día en que el que se efectúe la medición del IRI afectará al resultado del mismo.
- 8) De cara a la unidad terminada se debe tener en cuenta el efecto del alabeo en la medición del IRI.

6. Bibliografía

- 1) Choubale, Tia, "Nonlinear temperature gradient effect on maximum warping stresses in rigid pavements. Transportation Research Record 1370.
- 2) Norma 3.1-IC Trazado, Instrucción de Carreteras. Ministerio de Fomento
- 3) Norma 6.1-IC Secciones de Firme, Instrucción de Carreteras. Ministerio de Fomento.
- 4) Curso sobre los pavimentos de carreteras y sus materiales. Asociación Técnica de la Carretera. 2012
- 5) Rao S. & Roesler J. RCharacterizing effective Built-in Curling from Concrete Pavement Field Measurements. Journal of Transportation Engineering. 131, 4, 320-327. 2005.
- 6) Roesler, J. R. Fatigue of Concrete Beams and Slabs. Ph. D. Dissertation, University of Illinois, Urbana, IL. 1998.
- 7) Eisenmann, J. and Leykauf, G. Effect of Paving Temperatures on Pavement Performance. Proceedings, 2º International Workshop on Theoretical Design of Concrete Pavements. 1990.
- 8) Robert Rodden, thesis "Analytical modeling of environmental stresses in concrete slabs". University of Illinois at Urbana-Champaign, 2006.
- 9) Byrum, Christopher R. PhD, "The Effect of Slab Curvature on IRI Values for Jointed Concrete Pavements"
- 10) Merritt David K et al. "Evaluating the effects of concrete pavement curling and warping on ride quality". Report No. CDOT-2015-07. Colorado Department of Transportation. 2015.
- 11) Chang G.K et al. "Quantifying the impact of jointed concrete pavement curling and warping on pavement unevenness." 6º Symposium on Pavement Surface Characteristics: SURF 2008. 2008.
- 12) Andrew C. et al. "Shrinkage and thermal cracking of fast setting hydraulic cement concrete pavements in Palmdale, California". California Department of Transportation. 1999.
- 13) Rodden R. "Analytical modeling of environmental stresses in concrete slabs". University of Illinois at Urbana-Champaign. 2004.
- 14) Harr.M.E. "Warping stresses and deflections in concrete slabs". Purdue University Lafayette Indiana. 1958