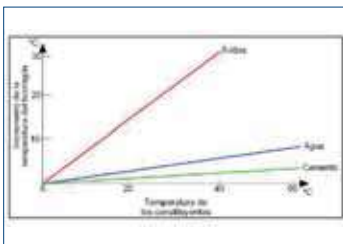


Análisis y prevención de la fisuración a edad temprana en losas de hormigón de pavimento mediante HIPERPAVE



Analysis and prevention of cracking at early age in pavement concrete slabs using HIPERPAVE

Jesús Díaz Cuevas

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

Resumen

En este artículo se analizan la necesidad y adecuación del diseño del hormigón y las condiciones de puesta en obra para la prevención del riesgo de fisuras a edad temprana. El diseño del hormigón y la puesta en obra deben adaptarse a los cambios de las condiciones climáticas que el pavimento soportará en las primeras horas, pues son de especial importancia para la aparición de fisuras por retracción. En este artículo se analiza, mediante el software HIPERPAV III, un pavimento de losas de hormigón no armado de la Instrucción 6.1 "Secciones de Firme", elaborado con cementos de la misma resistencia pero con diferente calor de hidratación y contenido de alúmina. Expuestos a condiciones meteorológicas opuestas. Analizando los efectos que conllevaría una elección inadecuada de los componentes o de su puesta en obra.

Abstract

This article discusses the need and adequacy of PCC design and circumstances for starting work, to prevent the risk of cracks at an early age. They must be adapted to changes in the climatic conditions the pavement will withstand in the first hours, since they are of special importance for the appearance of shrinkage cracks. In this article, a plain concrete slab pavement according to Standard 6.1 "Secciones de Firme", is analyzed using the HIPERPAV III software. Made with cements of the same strength but with different hydration heat and alumina content. Exposed to opposite meteorological conditions. Analyzing the effects that would lead to an inadequate choice of components or their start work.

1. Introducción

En este trabajo se analiza un pavimento de firme de hormigón de cemento Portland con una resistencia a flexotracción a 28 días de 4,5 MPa, con un espesor de losa de 25 cm y juntas cada 5 m, sección 134 de la Instrucción 6.1 [16]. Se diseñan dos hormigones iguales, pero con cementos diferentes. El primer hormigón contiene un cemento tipo I, según AASHTO M-85 [17], con una resistencia a compresión a 28 días de 42,5 N/mm². El segundo hormigón contiene un cemento tipo V, según AASHTO M-85 y con la misma resistencia a compresión. Ambos cementos se diferencian principalmente en el calor de hidratación y contenido de alúmina inferior en el tipo V, denominado también sulforresistente. Ambos diseños se exponen a dos escenarios meteorológicos opuestos. En el primer escenario se simula una puesta en obra en invierno y en el segundo una puesta en obra en verano. El análisis se lleva a cabo mediante el software HIPERPAV III validado por el U.S. Department of Transportation de la FHWA, a través del cual se introducen los parámetros de diseño del pavimento, dosificación del hormigón, puesta en obra y ante todo la meteorología a la que se enfrentará el pavimento durante las siguientes 72 h, en el análisis a edad temprana. Evaluando, entre otros parámetros, la ganancia de la resistencia

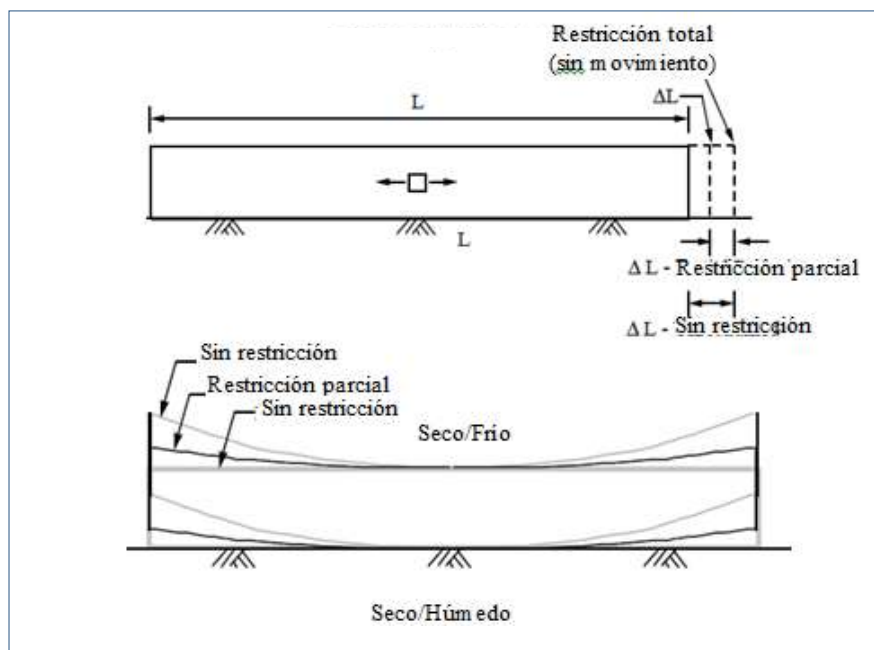


Figura1. Deformaciones horizontales y verticales en el periodo crítico

a tracción del hormigón ($f_c(t)$) y el aumento de las tensiones críticas ($\sigma(t)$): si éste supera a la primera se puede provocar la fisuración del pavimento en zonas no controladas, según la expresión (1). Teniendo establecidas las tensiones críticas y cuando se producen, se puede adaptar el tipo de diseño del hormigón o puesta en obra para que estas tensiones no superen la resistencia del hormigón y por tanto paliar las fisuras.

Las tensiones críticas se componen de: tracciones-compresiones por pandeo, debidas al efecto térmico (positivo o negativo), retracción y relajación por fluencia indicada en la expresión (2) y establecida en la Figura 1.

$$\sigma(t) \geq f_c(t) \quad (1)$$

$$\sigma = f(\pm \sigma_{\text{axial}} \pm \sigma_{\text{pandeo}} \pm \sigma_{\text{retracción}} \pm \sigma_{\text{fluencia}}) \quad (2)$$

El periodo crítico abarca la zona de transición, tras la fase plástica hasta la ganancia de rigidez del hormigón o zona de comienzo de mayor adquisición de propiedades mecánicas, como se aprecia en la Figura 2 (izquierda) (Mehta y Monteiro) [1]. En la misma figura (derecha), el comienzo de la ganancia de resistencia se establece en la rampa de subida de la temperatura de la losa, debida a la formación, principalmente, de C-S-H (silicato cálcico hidratado) y CH (hidróxido cálcico).

Por ello, si al aumento de las temperaturas del hormigón de carácter

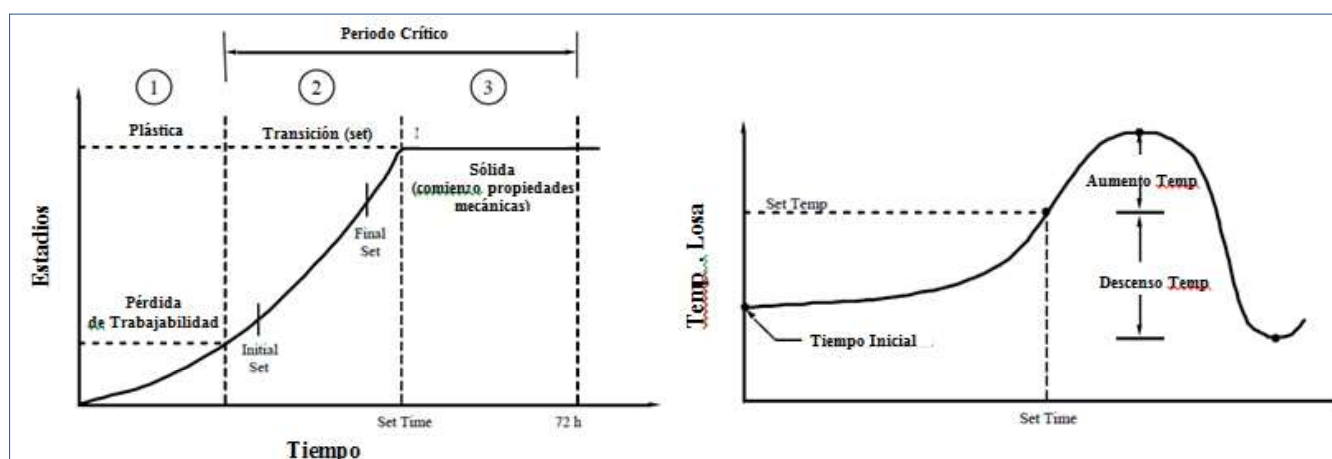


Figura2. Evolución de los cambios de fase en el hormigón y periodo crítico

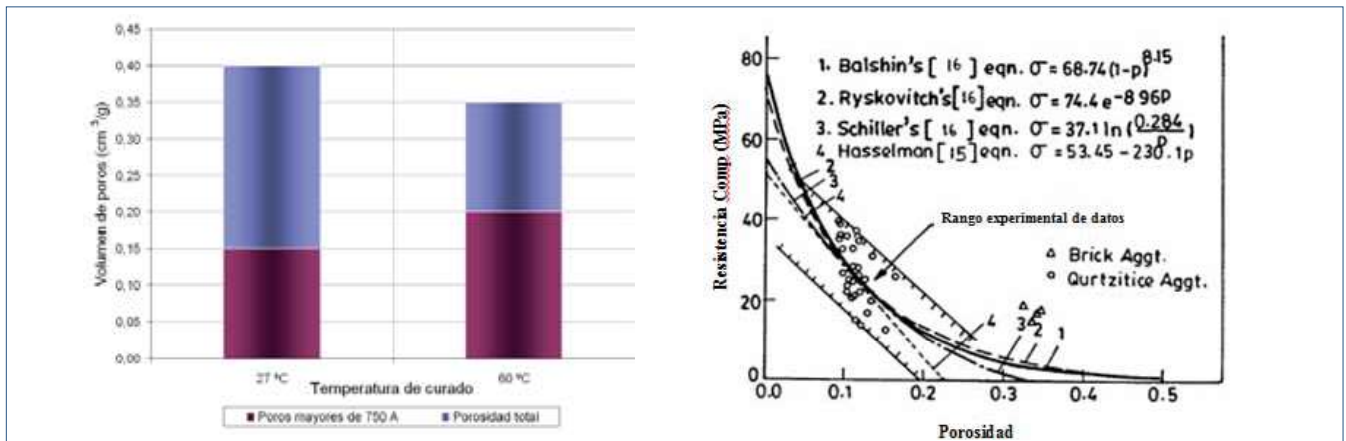


Figura 3. Diferencia de porosidad total y tamaño de poro en hormigones curados a distintas temperaturas

interno, por la formación de sus componentes, se suman condiciones externas adversas, se llegará a patologías no deseables en el hormigón. A continuación se exponen causas que afectarían al hormigón fabricado.

1 Temperatura ambiente y radiación solar: Los cambios térmicos entre la superficie de apoyo del hormigón y la superficie expuesta al sol deben minimizarse con el fin de evitar posibles fisuraciones térmicas. La Figura 3 (izda.) (Soroka) [11,12] muestra como hormigones de la misma resistencia, curados a temperaturas más altas tienen menos porosidad total; sin embargo, el tamaño del poro es mayor. Esto es de especial importancia para la permeabilidad del hormigón. En la misma figura (dcha.) (Kumar) [13], se aprecia la reducción de la porosidad con el aumento de la resistencia a compresión.

2 Velocidad del viento: La velocidad del viento afecta a las propiedades del hormigón en estado fresco, bajo el mecanismo principal de la evaporación del agua. Este efecto también tiene consecuencias sobre las propiedades del hormigón en estado endurecido, ya que la hidratación no es completa, lo que disminuye las propiedades mecánicas y la impermeabilidad. La Figura 4 [9] muestra esta evaporación en función de la temperatura, velocidad del viento y humedad relativa.

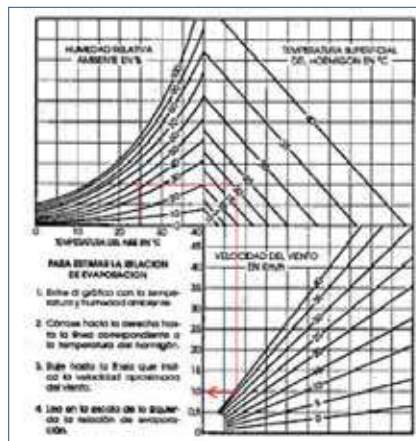


Figura 4. Evaporación superficial del hormigón (ACI 305)

3 Temperatura y tipo de los constituyentes: Una mayor temperatura del cemento o de los áridos favorece las reacciones, lo que conlleva una mayor hidratación y por consiguiente un asentamiento más rápido: lo que puede favorecer la aparición de fisuras. En la

Figura 5 se aprecia cómo influyen los distintos componentes en el incremento de la temperatura del hormigón: prevalecen los áridos, dado que representan el 75% de la masa; las propiedades térmicas de éstos también afectan al conjunto. La relación A/C también afecta, aumentando la temperatura con relaciones bajas. Los contenidos altos de superplastificante también favorecen dicha retracción. El ajuste de la dosificación de los productos de curado, en función de las condiciones ambientales, es importante para evitar las fisuras por retracción. Lo mismo ocurre con el contenido de cemento: cementos más finos y con valores altos de C_3A y C_4AF favorecen la retracción. Cementos con mayor resistencia tienden a sufrir mayor retracción autógena y es en la

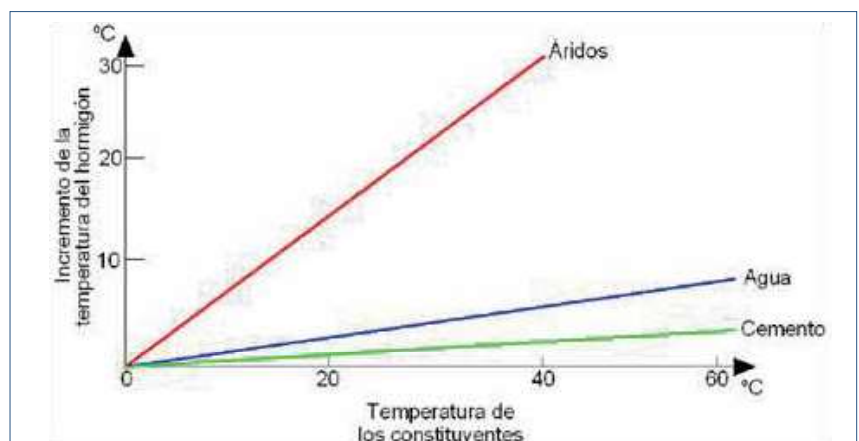


Figura 5. Incremento de la temperatura del hormigón en función de sus componentes



Figura 6. Representación esquemática de la hidratación del cemento

primeras 24 h donde representan un mayor papel (Nawa et al.) [4]. En la Figura 6 se puede observar la representación de la hidratación del cemento en el tiempo y velocidad de la evolución del calor [11,12]. Se aprecia como, desde el inicio del fraguado hasta unas horas después de su final, con la formación de C-S-H (silicato cálcico hidratado), la velocidad de evolución de fraguado es superior; y por tanto cuando pueden aparecer las mayores tensiones que provoquen las fisuras mencionadas.

En las primeras horas (2-3 h) se produce una retracción en la fase plástica del hormigón que puede dar lugar a pequeñas fisuras de forma aleatoria, que por estar en fase plástica pueden ser corregidas. Es un fenómeno motivado por la tensión capilar del agua en el interior de los poros. Si por las razones que fueren, la pérdida de agua en superficie excede de la cantidad aportada por exudación, se invierten las fuerzas capilares en los poros y se produce un vacío en su masa. Si la disminución de volumen se obstaculiza por armadura o encofrado en las zonas donde se ha tenido lugar la evaporación de agua, la probabilidad de fisuración aumenta (Metha y Montero 2008 [1]). La retracción plástica es mayor en la pasta de cemento que en el hormigón, por lo que hormigones fabricados con mayor conte-

nido de cemento y pasta tendrán mayor retracción plástica.

También existen las retracciones por secado y autógena. Pueden tener como principio la fisuración por retracción plástica. La retracción por secado, de mayor importancia que la autógena, está relacionada con la migración del agua en los poros capilares hacia zonas externas: si el gradiente es fuerte se provoca una descompensación de humedad que conlleva a una posible fisuración (Mindess et al.) [2]. Por ello existe reversibilidad en la retracción por secado cuando, en cierto intervalo de tiempo, la microestructura vuelve a estar en contacto con el agua (Figura 7). La retracción autógena tiene como origen las reacciones químicas entre el cemento y el agua. El volumen de los productos resultantes de la hidratación es

menor que el volumen original del cemento deshidratado y del agua, provocando la deformación de la pasta hidratada del cemento, y consecuentemente, del hormigón (Bibm et al) [3]. Ambas se producen de forma aleatoria, como las plásticas, y en sitios no determinados. Su longitud y profundidad también es variable. Esta contracción puede llegar a ser de hasta el 1%. La retracción autógena tiende a incrementarse con temperaturas elevadas.

4 **Tipo de base:** En los pavimentos de hormigón afectarán el tipo de base y sus condiciones, el grado de humedad y la temperatura, así como las restricciones, el grado de adherencia, el rozamiento y la curvatura, como se indicó en la Figura 1. Las bases húmedas permiten que el hormigón fresco colocado no pierda agua de hidratación debido a la absorción por la base. El grado de rugosidad de la base según el tipo de material (suelo tratado, fresado, mezcla asfáltica, granallado etc) afectará al rozamiento y a la curvatura, aumentando con el módulo elástico de la base.

5 **Método, tipo y tiempo curado:** El método y tipo de curado afecta a la transferencia de calor entre el hormigón y el exterior, y viceversa. Una duración inadecuada del tiempo de curado con el método elegido afectará también al comportamiento del hormigón.

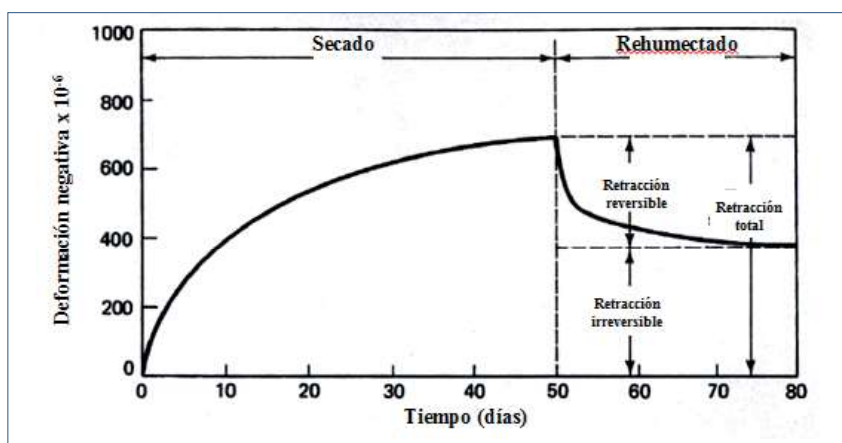


Figura 7. Retracción de secado compuesta por retracción reversible e irreversible (Mindess y Young, 1981)

6 Corte de juntas transversales y separación entre ellas: El corte de las juntas previene y acota la fisuración aleatoria, a mayor separación entre juntas, mayor superficie expuesta y por lo tanto mayor posibilidad de fisuración.

El software implementa, para el estudio a corto plazo, los modelos siguientes:

- Modelo de hidratación del cemento.
- Modelo de afección de la temperatura y humedad en el pavimento.
- Modelo de retracción por secado.
- Modelo de fluencia.
- Modelo de restricción axial no lineal.

2. Descripción del pavimento, tipo de base y hormigón

Para un correcto seguimiento y simulación es necesario implementar adecuadamente el diseño del hormigón, tipo de base, condiciones de la base, de puesta en obra y datos meteorológicos esperados en las 72 h siguientes, si se pretende efectuar una simulación a corto plazo.

El pavimento está compuesto por losas de hormigón de 3,5 m de ancho con juntas transversales cada 5 m y un espesor de losa de HP=25 cm y HM=15 cm. Corresponde a la sección 134 de la Instrucción 6.1. Para la visualización del comportamiento durante el curado del hormigón y la interacción con la base de suelo estabilizado S-EST3 se establece que la capa de hormigón magro y de hormigón de pavimento sea única, con un módulo elástico equivalente y con un espesor de 40 cm. El hormigón magro tiene una resistencia a compresión a 28 días de $R_c \geq 15$ MPa. El hormigón de pavimento tiene una resistencia a flexotracción de $MR \geq 4,5$ MPa a 28 días: a través de la expresión 21 de la ACI 330R podemos obtener el valor de la resistencia a compresión F_c a 28 días, obteniéndose un valor de 32,9 MPa. Según la expresión 22 de la ACI se pueden obtener los módulos elásticos de ambos hormigones. Los módulos elásticos obtenidos son, para el hormigón

magro, $E=19\ 200$ MPa y para el hormigón de pavimento, $E=25\ 300$ MPa. Se establece un módulo equivalente para una carga por rueda de 32 kN y presión de neumático de 0,9 MPa un valor de 22 800 MPa [18]. Según el art.512 del PG3 la explanada tipo E3 deberá tener un valor del módulo de compresibilidad mínimo de $E_{v2} \geq 300$ MPa, según la expresión 23 y para un coeficiente de Poisson de $\nu = 0,35$, el módulo elástico será $E \geq 276$ MPa. La explanada apoyará en un subyacente de suelo tolerable con un módulo de compresibilidad mínimo (según el art.330 del PG3) de $E_{v2} \geq 60$ MPa, a través de la expresión 23 y para un $\nu = 0,35$ se obtiene un valor de $E = 55$ MPa.

$$MR=2.3 \cdot F_c^{(2/3)} \text{ (lb/in}^2\text{)} \quad (3)$$

$$E=3.32 \cdot f_{ck}^{0.5} + 6.3 \text{ (GPa)} \quad (4)$$

$$E=\pi \cdot (1-\nu^2) \cdot E_{v2} / 3 \text{ (MPa)} \quad (5)$$

Como se ha indicado, el pavimento de hormigón se simula con dos tipos de cementos de la misma resistencia. Los cementos empleados son tipo I y V con una resistencia a compresión a 28 días de 42,5 N/mm², según AASHTO M-85, cuya diferencia estriba, principalmente, en el contenido de C_3A . El cemento tipo I tiene un calor de hidratación de 486 J/g a 7 días, y el cemento tipo V un valor de 436 J/g.

La dosificación base del hormigón es semejante para ambos tipos, sin embargo, se analizará cómo adaptar mejor la dosificación a los cambios climáticos con el fin de reducir las tensiones críticas. Los áridos empleados son de naturaleza silíceo y con tamaño máximo de 25 mm. Se emplea aditivo superfluidificante con el fin de reducir el contenido de agua. Con cierta función retardante, que permitirá el mantenimiento de la consistencia en el transporte del hormigón mediante camión convencional, aditivo clasificado como Tipo G según ASTM C 494 [14], capaz de reducir al menos un 12% en peso el contenido de agua. En la tabla siguiente se establecen los valores de los componentes del hormigón diseñado, sin corrección de

humedades ni absorciones. El diseño se ha realizado según la ACI 211 [15].

Materiales	Valores
Consistencia (mm)	25-50
Contenido de aire (%)	5
Superfluidificante (%)	0.25
Agua (Kg/m ³)	146
Relación A/C	0,42
Cemento (kg/m ³)	348
Árido grueso (kg/m ³)	1120
Árido fino (kg/m ³)	776
Densidad (kg/m ³)	2390
A/C	0,42

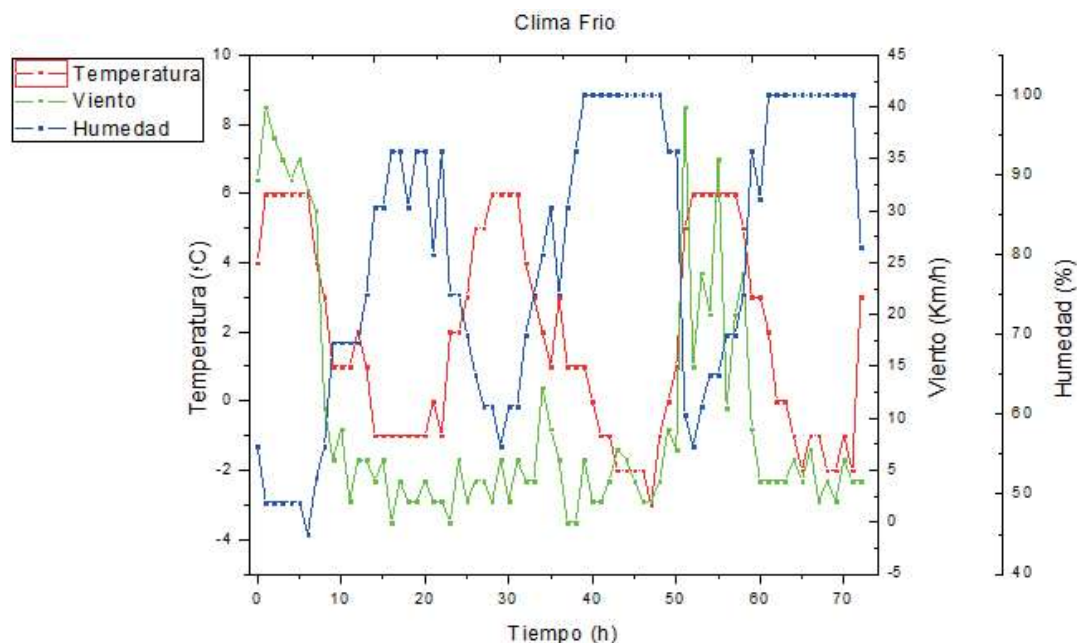
3. Descripción de las condiciones climáticas y de construcción.

Como se ha indicado se simulan dos escenarios climáticos, el primero en invierno y el segundo en verano. Se han elegido la ciudad de Madrid y la estación meteorológica de Barajas para recabar los datos necesarios. El año de construcción es el 2015, los días de hormigonado en tiempo frío y caluroso son el 19 de enero y el 6 de julio; se opta por ambas fechas para efectuar el hormigonado, por lo que se deben tener los datos meteorológicos de las 72 horas posteriores al mismo. El hormigonado en tiempo frío se establece a las 11:00 AM y en tiempo caluroso a las 8:00 AM.

En las figuras siguientes se ha representado en gráficas los valores de la temperatura, humedad y velocidad del viento para los climas frío y cálido.

En el clima frío se alcanzan temperaturas bajo cero y una máxima de 6 °C, con velocidad del viento de hasta 40 km/h y una humedad media del 79.8%. En el clima cálido se alcanzan temperaturas máximas de 40 °C, con un shock térmico de 20° C. La velocidad máxima del viento es de 40 km/h y la humedad mínima del 8%. Estos valores permiten calcular el grado de evaporación en las primeras horas, según se indicó en la Figura 4, y modificar así las actuaciones sobre el curado o bien retrasar el hormigonado.

	Tem. (°C)	Viento (km/h)	Humedad (%)
Máxima	6	40	45
Mínima	-3	0	100
Media	1,8	9,8	79,8
Dif.	9	40	55



	Tem. (°C)	Viento (km/h)	Humedad (%)
Máxima	40	40	8
Mínima	20	0	53
Media	31,5	14,8	23,1
Dif.	20	40	45

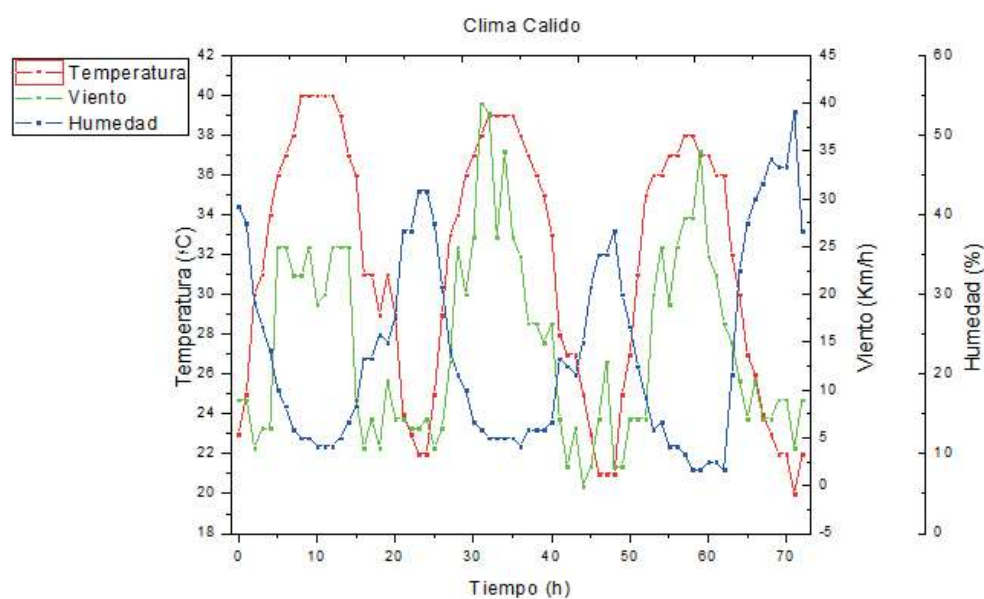
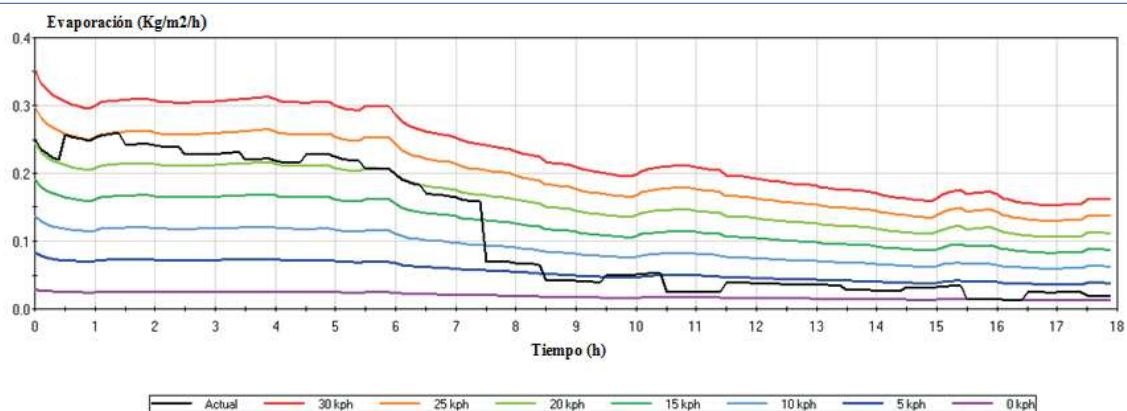
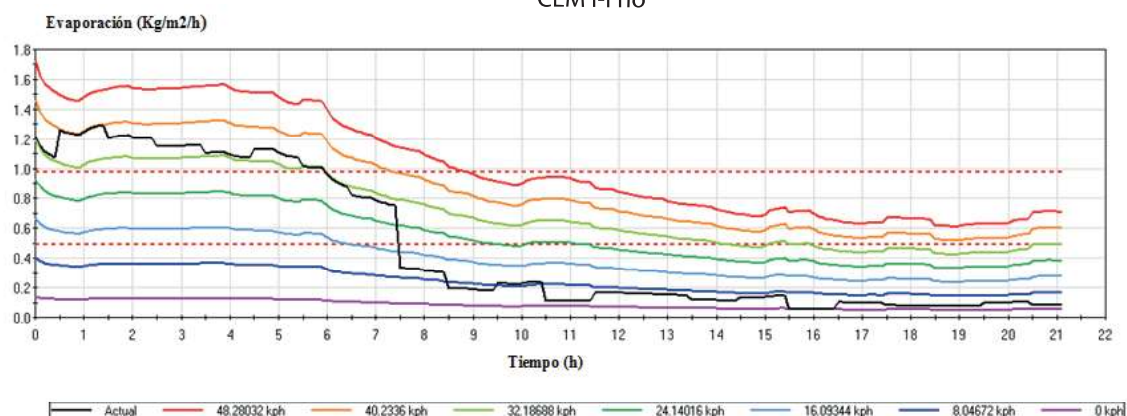


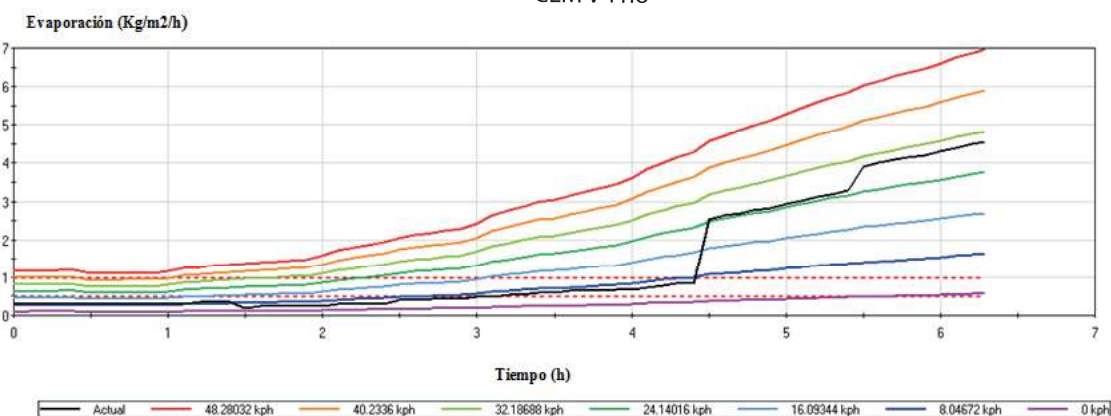
Figura 8. Valores de temperatura, velocidad del viento y humedad en las primeras 72h en clima frío y cálido



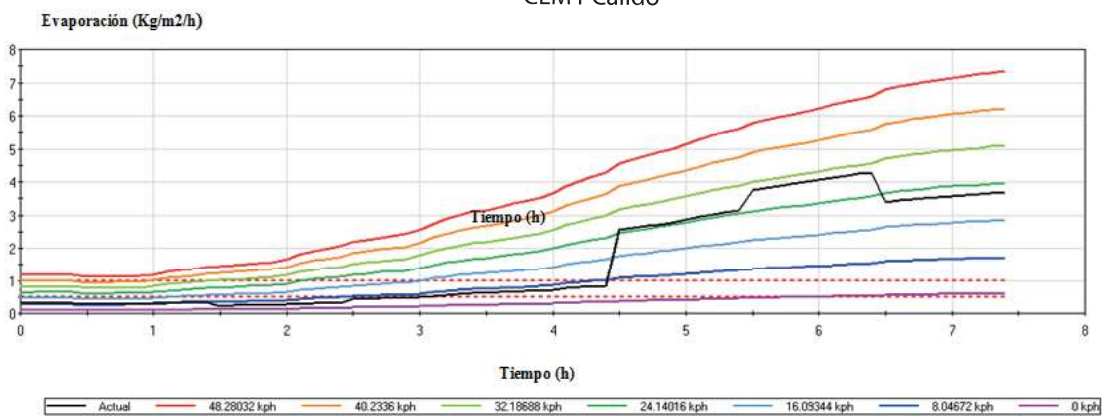
CEM I-Frío



CEM V-Frío



CEM I-Cálido



CEM V-Cálido

Figura 9. Valores de evaporación durante la fase plástica en clima frío y cálido para los tipos de cemento I y V

En las figuras siguientes se establecen los valores de evaporación en función de los datos meteorológicos para los dos climas y para los dos tipos de cemento, durante la fase plástica del hormigón (línea negra). La duración de esta fase es diferente para cada clima y tipo de cemento, siendo más

prolongada para el clima frío que para el clima cálido y para el hormigón con cemento tipo V que para el tipo I.

Se puede apreciar que la fase plástica del hormigón en clima frío, para el cemento tipo I, tiene una duración de 17,9 h y para el cemento tipo V de 21,3 h. En clima cálido la

duración es de 6,3 h y de 7,3 h respectivamente.

Se establece que la base de suelo estabilizado está húmeda antes de recibir el hormigón, tanto en el clima frío como cálido, evitando así una absorción no deseada por parte de la base del agua de hidratación del hormigón. La protección tras el extendido se establece mediante un riego de curado con producto filmógeno que se efectúa en tren de riego tras la extendedora. El primer aserrado de juntas se efectúa tras la fase plástica del hormigón, determinadas anteriormente.

4. Análisis de resultados

4.1 Diseño Inicial

Para el diseño inicial y procedimiento de construcción, establecidos en puntos anteriores, se obtiene para el clima frío y para el cemento tipo I que las tensiones críticas superan la resistencia a tracción alcanzada por el

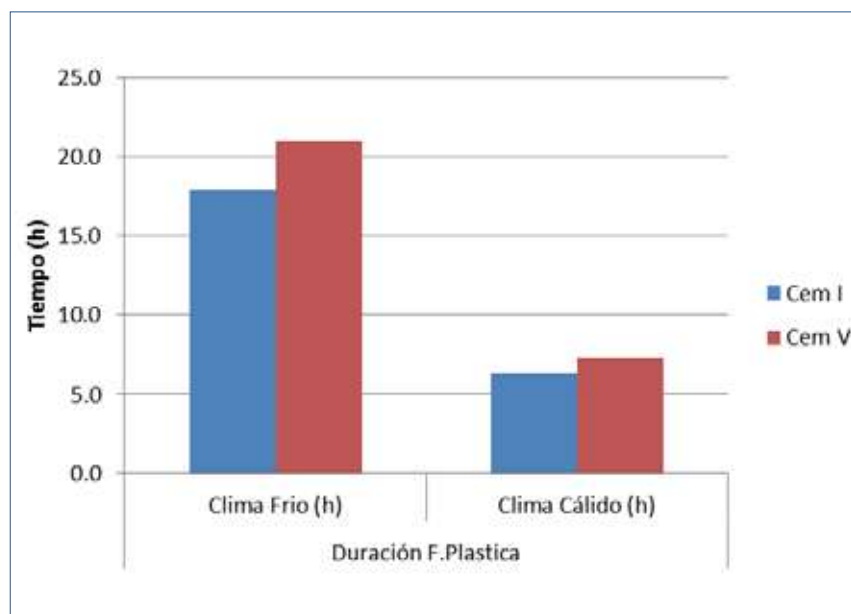


Figura 10. Duración de la fase plástica

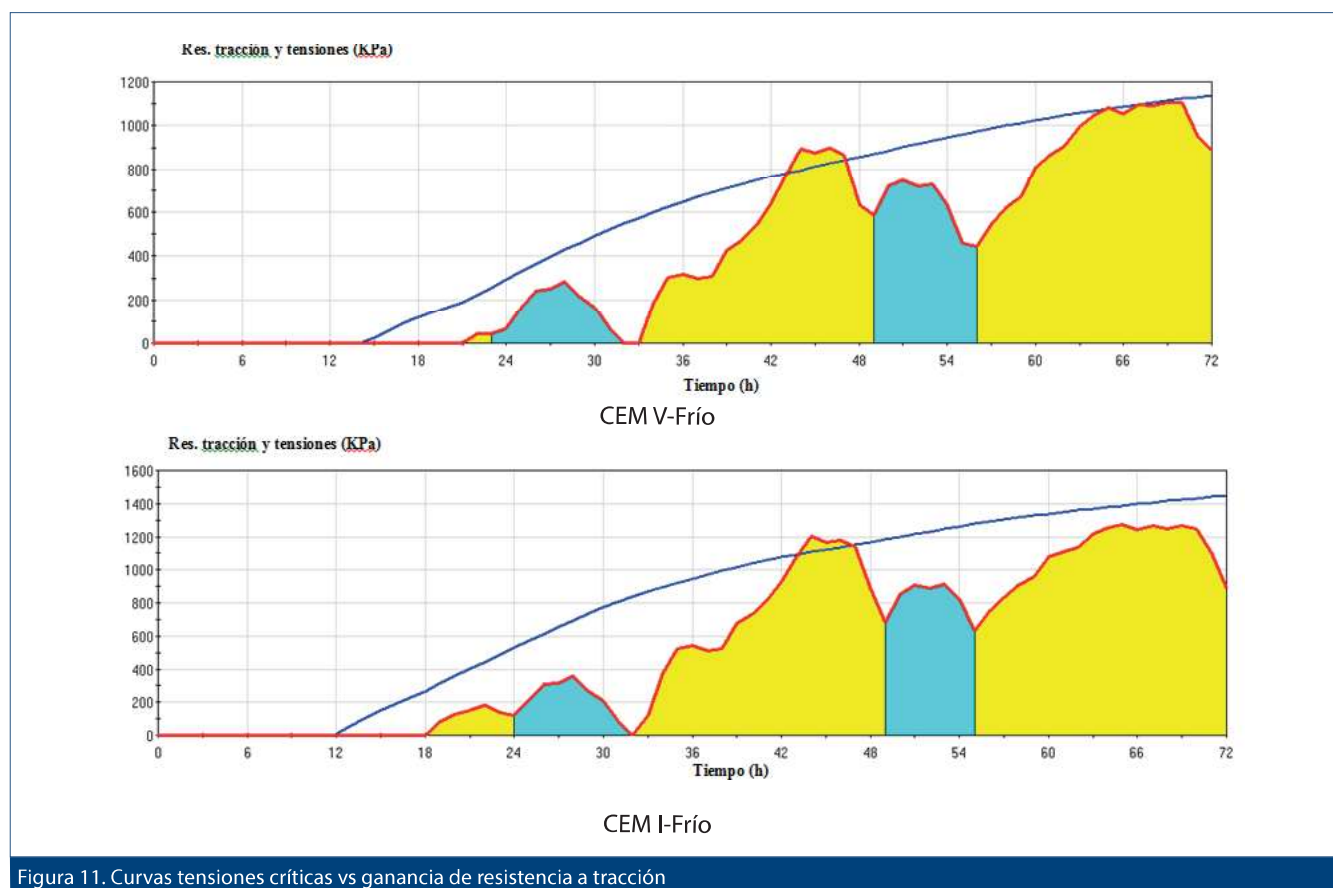


Figura 11. Curvas tensiones críticas vs ganancia de resistencia a tracción

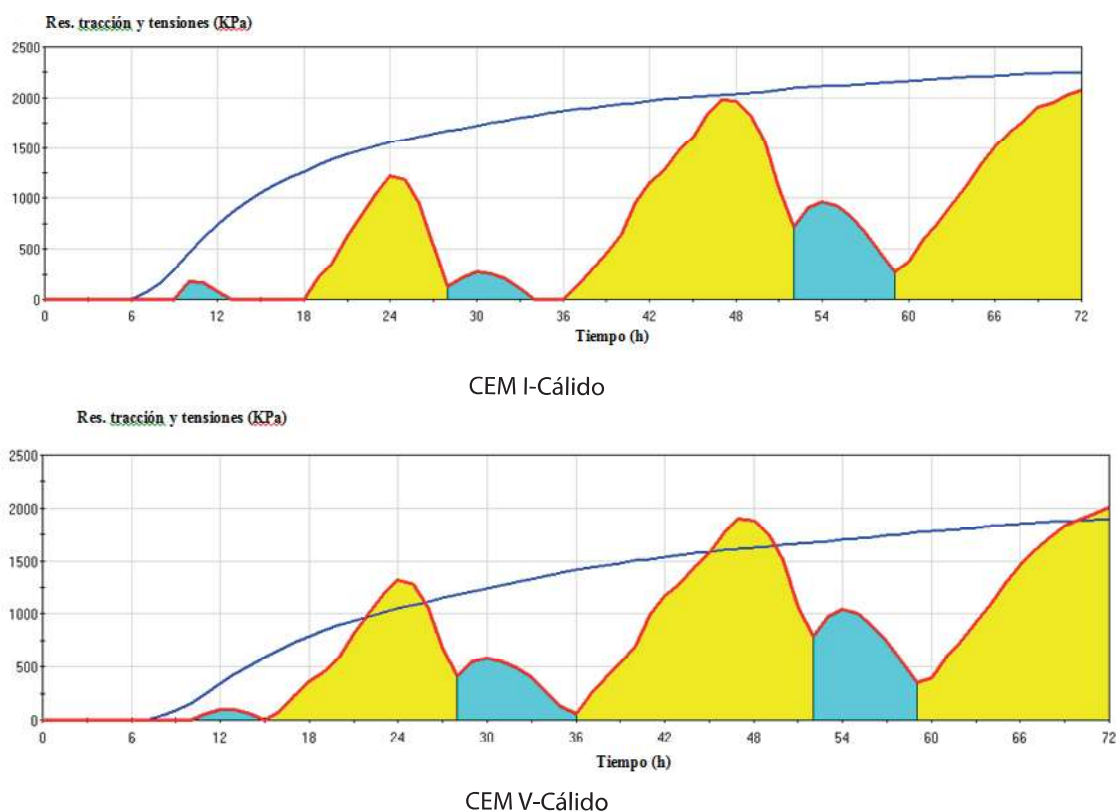


Figura 12. Curvas tensiones críticas vs ganancia de resistencia a tracción

hormigón a las 44 h. Con el cemento tipo V las tensiones críticas superan la resistencia a tracción alcanzada por el hormigón a las 44, 65 y 67 h (Figura 11). Es decir, el riesgo por fisuración es superior empleando un cemento tipo V, con menor calor de hidratación, que un cemento tipo I con mayor calor de hidratación. La menor ganancia de resistencia del hormigón tipo V conlleva que las tensiones críticas superen la resistencia y con ello aumente el riesgo de fisura. En la Figura 11 se puede apreciar cómo las tensiones críticas, establecidas por la línea roja del perímetro de tensiones, intersectan a la curva de ganancia de resistencia del hormigón en las primeras 72 h. También se puede ver que la ganancia de resistencias con el cemento tipo I es superior a la del tipo V.

Para el clima cálido y para el cemento tipo I las tensiones críticas no superan la resistencia alcanzada, no existiendo riesgo de fisuración. Con el cemento tipo V las tensiones críti-

cas superan la resistencia a tracción alcanzada por el hormigón a las 22, 46 y 70 h (Figura 12). En este caso, al contrario de lo que se puede pensar a priori, el riesgo por fisuración es superior empleando un cemento tipo V, con menor calor de hidratación, que un cemento tipo I. La ganancia de resistencia es superior, para ambos hormigones, tanto en el clima cálido como en el clima frío. Sin embargo, para el cemento tipo V la ganancia no es suficiente como para superar las tensiones críticas que se producen.

4.2 Optimización del diseño o procedimiento.

Se ha comprobado, para los ejemplos establecidos, que el cemento tipo I es más recomendable para ambos tipos de clima. La diferencia de calor de hidratación entre ambos cementos podría indicar que es más adecuado el cemento tipo I para clima frío y el cemento tipo V para cli-

ma cálido, pero como se ha podido comprobar no es una decisión que se deba tomar sin un análisis concreto y particular.

En diversas normativas se establece que los cementos sean sulforresistentes o indican un valor máximo de contenido de alúmina, de cara a una mayor durabilidad ante el empleo de materiales como sales o productos químicos en la fase de conservación. El cemento tipo I tiene un contenido de alúmina de $C_3A = 9\%$, no siendo resistente al ataque de sulfatos. Por ello, si existiese una restricción para su empleo, se debería adaptar el diseño o la puesta en obra del hormigón con cemento tipo V para que no se produjera riesgo de fisuración a edad temprana.

A continuación se establecen simulaciones, para ambos climas, atendiendo a la restricción mencionada, empleándose sólo cemento tipo V. Determinando qué modificaciones se pueden establecer para eliminar el riesgo de fisuración.

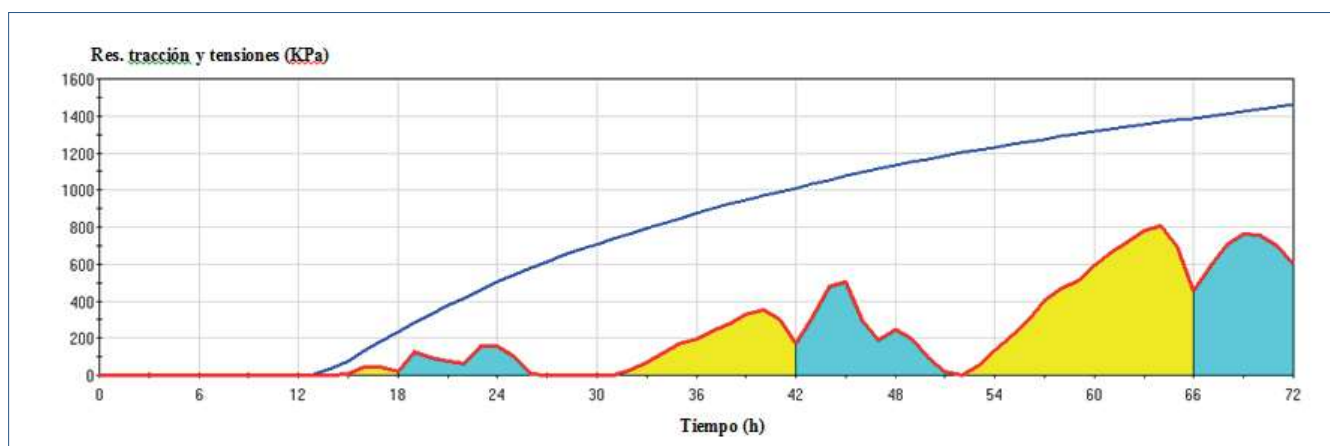


Figura 13. Curvas tensiones críticas vs ganancia de resistencia a tracción

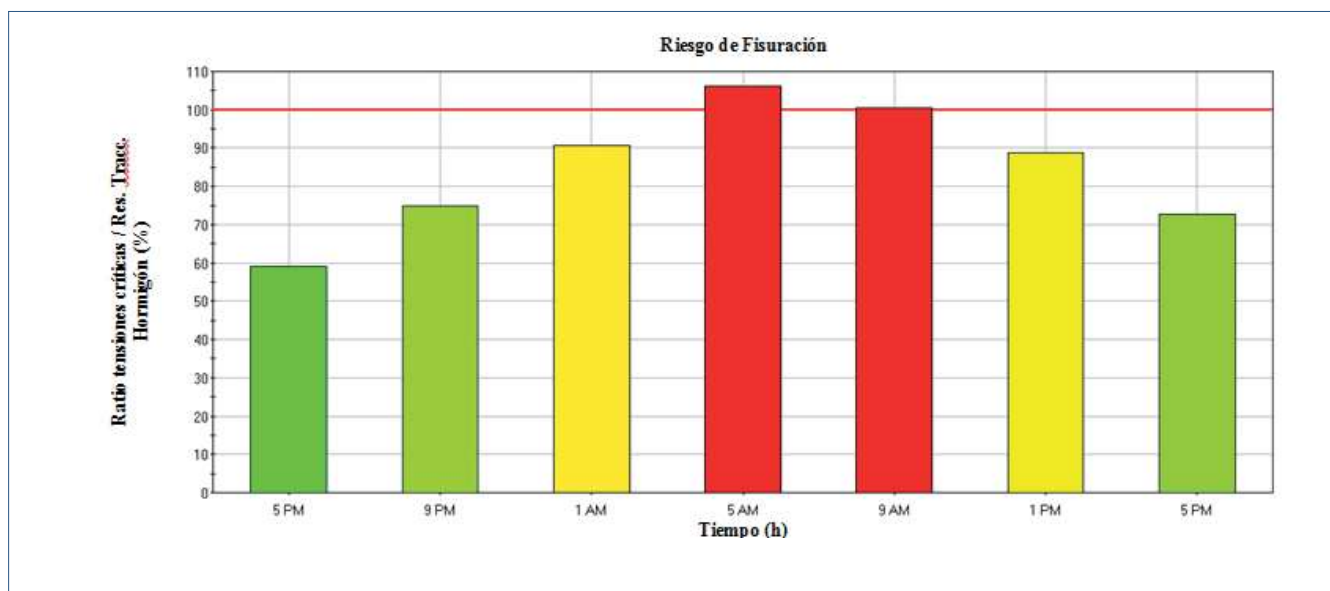


Figura 14. Riesgo de fisuración según hora de comienzo del hormigonado

En el clima frío se estableció la hora de comienzo del hormigonado a las 11 AM. En este caso se obtuvieron riesgos de fisuración a las 44-65-67 h, obteniéndose las mayores tensiones en la parte superior de la losa (sombreado amarillo). El tiempo en el que se produce el mayor calor de hidratación coincide con las horas del día donde se registra más temperatura y donde se produce más evaporación (6°C - $0.25\text{ kg/m}^2/\text{h}$). Pasando en 14 h a un descenso de temperatura de hasta -1°C , este gradiente térmico favorece el riesgo de fisuración [19], pues a esa edad se produce la mayor velocidad de evolución del calor y formación de C-S-H, tal y como se mostró en la Figura 6. A la vista de los valores de

evaporación se opta por retrasar el comienzo del hormigonado en 6 h, estableciendo además una protección con manta de algodón durante las 72 h siguientes. La Figura 13 muestra que la curva tensiones críticas no superan la resistencia del hormigón, obteniéndose un ratio máximo tensiones críticas/resistencia hormigón del 59%.

En la Figura 14 se establecen los riesgos de fisura dependiendo de la temperatura de comienzo del hormigonado, puede verse que la hora modificada es la más óptima para comenzar el hormigonado.

Para el clima cálido se establece la misma dosificación pero cambiando el tipo de curado. En la Figura 15 se puede ver que una protección del

pavimento durante las primeras 72 h con manta de algodón o plástico más manta establece el riesgo de fisuración por debajo del 100%.

En la Figura 16 se establece una modificación de la hora de comienzo del hormigonado, que inicialmente era a las 8 AM. Se puede ver que comenzar el hormigonado entre las 4-8 PM disminuye el riesgo de fisuración por debajo del 100%. Debido al descenso de la temperatura, velocidad del viento y aumento de la humedad.

Una disminución de la relación A/C reduce la retracción y por tanto el riesgo de fisuración [20]; una mejora de estos parámetros reducirá el riesgo de fisuras para los métodos de curado mencionados en la

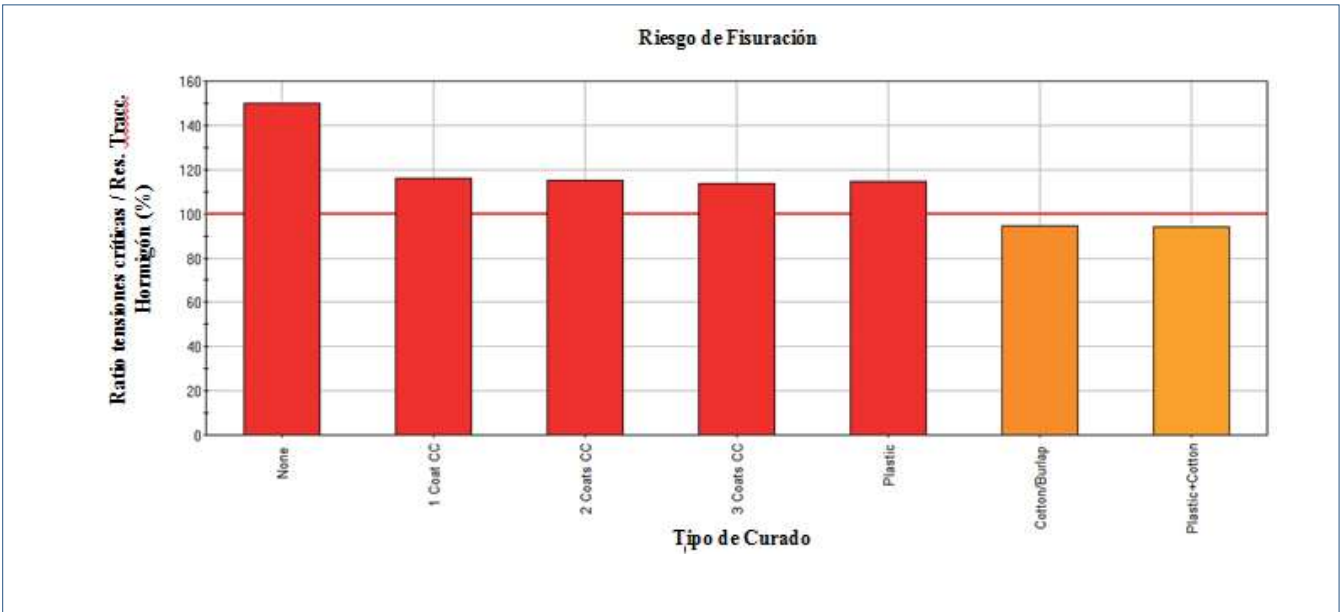


Figura 15. Riesgo de fisuración según el método de curado

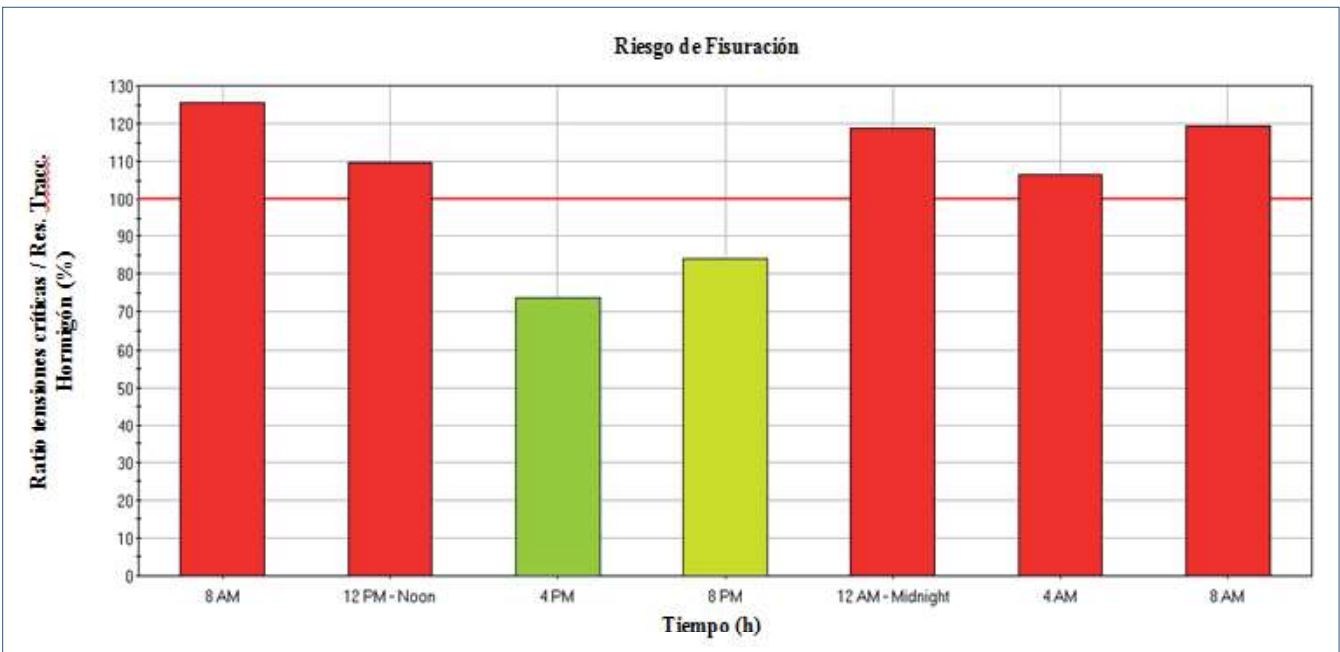


Figura 16. Riesgo de fisuración según hora de comienzo del hormigonado

Figura 15. Reducir la temperatura del hormigón y de la base también mejora la posibilidad de formación de fisuras. La combinación de algunos de los elementos indicados también conllevaría a reducir el riesgo. A modo de ejemplo se simula en la Figura 17 un diseño con 10 kg/m³ más de cemento, con un aumento de la relación árido grueso/cemento del 2,7%, un descenso de la relación A/C a 0,40, un descenso de la temperatura del hormigón de 8 °C y de la base de 4 °C

(mediante enfriamiento de árido en planta y riego de base en extendido). Puede verse que las tensiones críticas ya no superan la resistencia a tracción del hormigón.

5. Conclusiones

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

- 1 Se analiza mediante HIPERPAVE el comportamiento del hormigón a

edad temprana de la sección 134 de Instrucción 6.1 “Secciones de Firme” en dos escenarios climáticos opuestos y con cementos de diferente contenido en alúmina y calor de hidratación.

- 2 Se evalúan las tensiones críticas y resistencia del hormigón durante las primeras 72 h, con el fin de determinar el riesgo de fisuración del hormigón. Para clima frío el cemento tipo I tiene un mejor comportamiento, con un ratio de riesgo de fisura del 109% a las 44 h, frente al 112% para

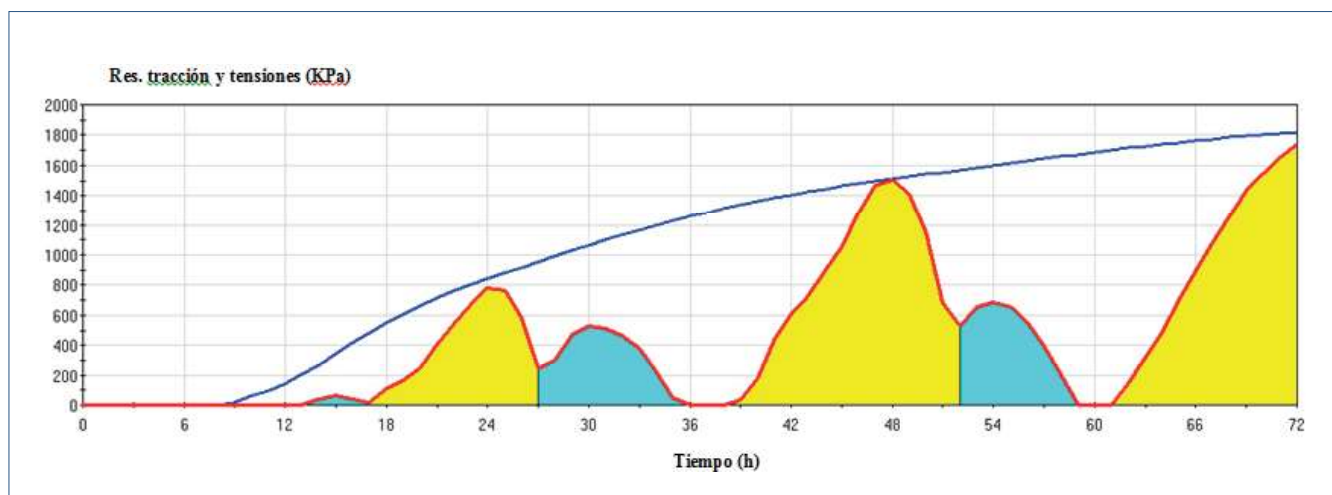


Figura 17. Curvas tensiones críticas vs ganancia de resistencia a tracción

- el cemento tipo V a la misma edad. Para clima cálido, al contrario de lo que podría pensarse y para las condiciones establecidas, el cemento tipo I también tiene un mejor comportamiento, no presentando riesgo de fisura, frente a un riesgo del 122% a las 22 h para el cemento tipo V.
- 3 La obligatoriedad de emplear cementos con bajo contenido en alúmina, como el tipo V, hace necesario modificar el diseño o puesta en obra del hormigón. En los casos estudiados un retraso en el hormigón en ambos climas y una protección mediante manta de algodón reduce el riesgo de fisuración por debajo del 100%.
 - 4 Aumentos en la relación árido/cemento, reducción de la relación A/C, aumento del contenido de cemento, enfriamiento de la temperatura del hormigón y de la base, adecuación del momento de corte de la junta reducen el riesgo de fisura de forma adecuada.
 - 5 Como conclusión final se puede indicar que el estudio del diseño del hormigón, de su puesta en obra y de las condiciones meteorológicas mediante herramientas como HIPERPAVE permiten reducir la aparición de ciertas patologías no deseadas en las losas de hormigón. O incluso determinar qué ha ocurrido en losas con patologías establecidas a edad temprana.

6 Bibliografía

- 1 Metha, P.K.; Monteiro, P.J.M.; *Concreto: Microestructura, Propiedades e Materiais*. Ibracon; 2008
- 2) Mindess, S., Young, F.J., Darwin, D.; *Concrete*. Prentice-Hall; 2003
- 3) Bibm, Cembureau, EFCA, EFNARC, ERMCO. *The European Guidelines for Self-compacting Concrete*; 2005
- 4) Nawa, T., Horita, T.; *Autogenous Shrinkage of High Performance Concrete. Proceedings of the International Workshop on Microstructure and Durability to Predict Service Life of Concrete Structures*; 2004
- 5) ACI 209.2R-08 *Guide for Modeling and Calculating Shrinkage and Creep in Hardened Concrete*. American Concrete Institute.
- 6) Ministerio de Fomento; *EHE-08 Instrucción de Hormigón Estructural*; 2008
- 7) CEB-FIB MC90-99. *Model Code 1999. International Federation for Structural Concrete*.
- 8) B. Persson et al.; *Self-desiccation and its Importance in Concrete Technology*. Lund Institute of Technology. Lund University; 2005
- 9) ACI 305.1-06; *Hot Weather Concreting*. American Concrete Institute.
- 10) Jawed, I., Skalny, J. y Young J.F.; *Hydration of Portland Cement*; 1983
- 11) Velasco A. T.D.; *Estudio experimental sobre la reacción álcali-sílice en el hormigón producida por áridos de reacción lenta*; . UPM. EICCP. 2014
- 12) Soroka, I. (1993), *Concrete in Hot Environments*.
- 13) Kumar et al.; *Porosity, pore size distribution and in situ strength of concrete*. Bridges Division, Central Road Research Institute, New Delhi 110 020, India.; 2001
- 14) ASTM C494; *Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete*.
- 15) ACI 211.1-91; *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete*.
- 16) Ministerio de Fomento; *Norma 6.1-IC Secciones de Firme, Instrucción de Carreteras*.
- 17) AASHTO M-85; *Standard Specification for Portland Cement (Chemical and Physical)*.
- 18) одн218.046-01.Проектирование нежестких дорожных одежд. Отраслевые дорожные нормы.
- 19) HIPERPAVE. Case Study: *Cold Front*. The Transtec Group, Inc.
- 20) Neville, A. M., *Properties of concrete*, Pearson Prentice Hall, 4th edition, 2002. ❖