

DETERIOROS PREMATUROS DE UNA CALZADA DE HORMIGÓN, CONFLUENCIA DE CAUSAS, DIAGNOSTICO Y PREVENCIÓN

Marcelo Zeballos^{1,a}, Guillermo Gerbaudo^{2,b} y Leonardo Cocco^{3,c}

¹Area de Geotecnia, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba.

²Departamento de Construcciones Civiles, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba.

³ Departamento de Construcciones Civiles, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba.

^a marcelozeballos@yahoo.com.ar, ^bggerbaudo@efn.uncor.edu,
^cleonardococco@gmail.com

Resumen

Cuando se realiza una calzada utilizando hormigón se espera que sea durable, resistente, económica y confortable para el periodo de tiempo para la cual fue diseñada que por lo general supera los veinticinco años. Sin embargo, bajo determinadas circunstancias, es posible una combinación de factores que pueden contribuir a la generación de fenómenos de deterioro en forma prematura.

El presente estudio muestra algunas experiencias obtenidas por los autores en la evaluación de los factores que concurren a la generación de deterioros prematuros en una calzada de hormigón de reciente construcción dando especial énfasis en las acciones térmicas.

Con la finalidad de interpretar el comportamiento térmico de la losa del pavimento en estado endurecido se desarrollaron modelos de elementos finitos que procuran simular macro y micro situaciones. Los mismos, permiten analizar la influencia de variables, tales como el gradiente térmico variable en la altura de la losa, condiciones de contacto parcial de la losa respecto del terreno de apoyo, las propiedades elásticas y térmicas de los agregados empleados y la dimensión de la losa.

Por último, los resultados de los modelos computacionales se verificaran por medio de la observación visual, análisis de registros y resultados de ensayos.

Palabras-clave: calzada de hormigón, materiales componentes, temperaturas, sistema de contacto de losa, dimensiones de losa, fisuración.

1. Introducción

Los conceptos básicos de diseño de una calzada rígida implican que el diseño establecido para la losa de hormigón derive en una estructura durable, resistente, económicamente conveniente y confortable para el período de vida útil para la cual ha sido diseñada que, por lo general, supera los veinticinco años.

La mayor parte de los procesos de diseño, atienden a las solicitudes que la estructura recibirá durante su vida útil, en particular, las generadas por la acción del tránsito, considerando que el material sobre el cual se aplican ha desarrollado la totalidad de su capacidad resistente, condición ésta conocida como condición de servicio.

Sin embargo, no debe dejarse de considerar que las cargas de tránsito son sólo uno de los potenciales factores de sollicitación sobre este tipo de estructuras. Bajo determinadas circunstancias, es posible una combinación de factores que pueden contribuir a la generación de fenómenos de deterioro en forma prematura. Se combinan, en este tipo de casos, aspectos propios del comportamiento estructural del pavimento (cargas externas, condiciones de apoyo de la estructura vial), con elementos derivados de los procesos tecnológicos (endurecimiento del material desde su colocación, materiales empleados, condiciones climáticas en el momento de su construcción, etc.). Estas situaciones se pueden dar en etapas constructivas o de operación de la calzada, no obstante en ambas circunstancias serán consideradas como condiciones de carga constructivas u operativas.

El presente estudio muestra algunas experiencias obtenidas por los autores en la evaluación de los factores que concurren a la generación de deterioros prematuros en una calzada de hormigón de reciente construcción. Para considerar la influencia del clima en las situaciones observadas, es necesario tener en cuenta que estas construcciones han sido realizadas en la zona Mesopotámica de la Argentina.

Los casos observados muestran situaciones de generación de diversos niveles de deterioro, en un período inferior a un año, desde su habilitación al tránsito. Se aprecia un conjunto variado de formas de deterioro, la mayoría de ellas con diferentes niveles en su estado actual de manifestación. La mayoría de las formas de deterioro observadas responden a manifestaciones reconocidas en la literatura internacional, lo cual ayuda en la interpretación de los posibles causales de su aparición.

Se ha valorado la incidencia de diversos factores, tales como: la condición climática, las características de los agregados empleados, sus propiedades elásticas y térmicas, el tipo y contenido unitario de cemento, el tiempo de hormigonado, el proceso de curado y factores estructurales, tales como, la dimensión de la losa y el sistema de contacto losa – capa de apoyo. La posibilidad de valoración de algunos de estos aspectos en forma específica permite la revisión de las recomendaciones frecuentemente aplicadas en las especificaciones técnicas comúnmente aplicadas para este tipo de obras.

Por medio de la observación visual, análisis de registros y la utilización de modelos computacionales se ha evaluado la relevancia de la confluencia de las causas. Consecuentemente, se presentan algunas consideraciones respecto de la trascendencia de algunas formas de deterioro, y su posterior tratamiento futuro.

2. Situación de Estudio

Los análisis han sido realizados sobre el caso de pavimentos de hormigón destinados a la conformación de un sistema de autovía, con calzadas separadas. El pavimento ha sido diseñado siguiendo lineamientos de uso frecuente en este tipo de estructuras (método AASHTO'93 y PCA).

Respecto de la composición estructural, la misma sigue la siguiente secuencia: 25 cm de losa de hormigón, 15 cm de suelo cemento, apoyo sobre una subrasante formada por suelos con alto contenido de arcillas. Estos suelos muestran un comportamiento altamente plástico, con elevada susceptibilidad a la presencia de agua. En tal sentido, los fenómenos de variación volumétrica se hacen evidentes cuando el suelo forma parte de terraplenes de baja altura, ubicados en zonas con escasas pendientes regionales y proclives a sufrir inundaciones con duraciones prolongadas.

Con la intención de lograr una mejor distribución de las cargas de vehículos sobre el borde externo de la calzada, las losas de esa parte de la vía han sido incrementadas en su ancho, respecto del correspondiente al semicarril normal de la calzada, alcanzado los 4,25 metros de ancho. Dentro de esta dimensión los 0,60 metros externos corresponden a la banquina pavimentada. Bajo este criterio de diseño, la práctica común en este tipo de obras, ha asumido que el sistema puede asumirse como una calzada, con banquetas pavimentadas. La separación de juntas transversales es igual a 4,50 metros.

Respecto de los agregados empleados, los pliegos de especificaciones no establecen requisitorias particulares, por lo que se utilizaron cantos rodados locales. Mineralógicamente, gran parte de los componentes de estas fuentes se corresponden con calcedonias.

Geográficamente, la obra se localizada en el sector sur de la Mesopotamia Argentina. La zona se caracteriza por su clima semi tropical, con elevadas temperaturas ambiente, especialmente en los meses de verano. La zona se caracteriza por la formación de frentes de tormenta que generan precipitaciones de gran intensidad originando, no sólo el aporte de importante cantidad de agua en el terreno, sino también, efectos de sensible modificación de la temperatura ambiente.

La caracterización de los procesos de deterioro de los pavimentos rígidos ha sido realizada por diversos autores, los cuales derivan en la organización de los mismos en forma de catálogos de sistemas de fallas (FHWA, 2003; TRB, 2006; FHWA, 2007). En términos generales, la caracterización de los procesos de deterioro puede realizarse en función de diversos factores. Uno de ellos se relaciona con el momento en que se manifiesta el mismo. En este sentido, se pueden caracterizar los efectos según que los mismos se produzcan durante el proceso de endurecimiento del hormigón o cuando este ya ha logrado gran parte de su capacidad resistente final. Así, y a pesar de que, en función de la vida útil prevista para las obras observadas, los tiempos transcurridos desde su construcción son breves, los efectos de deterioro encontrados pueden ser divididos en dos grupos:

- ***Deterioros generados durante el proceso de endurecimiento del hormigón.*** También denominado en varias fuentes bibliográficas como deterioro a temprana edad del hormigón. Dentro de este grupo deben incluirse formas que ocurren en estado fresco, durante el proceso de fragüe del hormigón y otras que se

desarrollan en el proceso de endurecimiento (primeros días). Dentro de este grupo, las formas más frecuentemente observadas son:

- Mapeo Superficial a Edad Temprana
 - Fisuras por cambios térmicos y/o del contenido de humedad en el proceso de endurecimiento.
 - Peladuras por arrastres de áridos.
- ***Deterioros generados en el hormigón endurecido.*** Comprenden manifestaciones de deterioro que pueden ser atribuidas a hechos ocurridos con posterioridad al hormigonado, y que, con independencia o no de la continuidad estructural de la losa, deben su existencia a factores relacionados con aspectos climáticos (cambios térmicos), de acción del tránsito o de reacción del sistema de apoyo de la losa. Las principales formas en que se presentan estos efectos son:
 - Fisuras dependientes de la reacción del apoyo de la losa.
 - Peladuras y Desprendimientos.
 - Pérdidas de textura.

Varias de estas formas de deterioro han sido apreciadas en las secciones de obra bajo análisis. En virtud de la caracterización presentada, se desarrolla a continuación un análisis de factores que pueden considerarse incidentes, o causantes de algunas de las formas de deterioro, se revisa su importancia y trascendencia para el comportamiento general de la obra. Dentro del conjunto de efectos apreciados, las fisuras, tanto a edad temprana, como generadas sobre el hormigón endurecido, son tratadas en formas más detalladas.

3. Deterioros a Edad Temprana

Las principales formas de deterioro a edad temprana observadas se corresponden con dos formas de manifestación: el mapeo superficial, y la formación de fisuras por contracción. Sobre las primeras se ha efectuado un análisis de la ocurrencia de las mismas, y sus potenciales causas de generación, en tanto que en el caso de las segundas se analizan los diversos factores que potencialmente concurren para su presencia.

Mapeo Superficial

Se manifiestan como un conjunto de fisuras que se extienden sólo en la parte superior de la losa. Las fisuras de mayor longitud suelen orientarse en el sentido longitudinal de la calzada, y se encuentran interconectadas por fisuras transversales dispuestas en forma aleatoria. En general, el entramado de estas fisuras define paños de dimensiones de entre 20 y 40 mm, en los casos de mayor densidad superficial con profundidades de entre 3 y 5 mm.

La literatura clásica señala que las principales causas de aparición de este tipo de patología pueden deberse a la convergencia de uno o varios factores, muchos de ellos operativos. Así, se suelen señalar aspectos de deficiencia en el acabado superficial del hormigón, curado inadecuado y/o demoras en el desarrollo de las operaciones de terminación superficial. Estos u otros factores derivan en fenómenos de contracción plástica, causadas por la restricción de contracción

debido a “secado” excesivo de la capa superficial de hormigón, después de fraguado.

Si bien se aprecia esta forma de deterioro en el conjunto de las losas observadas, con grados variables de densidad, se ha observado que su desarrollo es de carácter netamente superficial, sin evidenciar, al momento de los relevamientos, tendencias a una progresión hacia formas de falla de mayor complejidad.

Fisuración por Contracción

A los fines de evaluar la influencia de distintos factores dentro de las formas de deterioro observadas, se ha realizado una revisión numérica de situaciones típicas observadas. La misma ha sido efectuada a través de la utilización del programa HIPERPAV, del FHWA (2005). La Fotografía 1 muestra un ejemplo de las fisuras observadas. Se aprecia que muchas de estas fisuras tienen una disposición ordenada en relación con los sistemas de barras y pasadores de la losa.



Fotografía 1. Vista de fisuras de contracción.

Las modelaciones numéricas realizadas procuran evaluar las relaciones tensionales entre las curvas de crecimiento de la resistencia del hormigón y las tensiones críticas de tracción generadas en la losa de hormigón sometida a las acciones conjuntas de variaciones térmicas por fragüe y las debidas a la condición climática. Se considera que la falla ocurre en los casos en que la tensión de tracción supera a la resistencia a tal tipo de sollicitación desarrollada en el hormigón a temprana edad, pudiéndose identificar el tiempo que transcurre desde la colocación del hormigón hasta el momento en que esta falla ocurre.

Los parámetros básicos de las modelaciones realizadas se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros básicos empleados en las modelaciones iniciales

Grupo	Variable	Valor	Unidad
Dimensiones de la losa	Ancho de losa	4.25	m
	Espesor de losa	25	cm
	Separación entre juntas	4.50	m
Materiales de apoyo	Tipo de material en subbase	Suelo cemento	
	Módulo de Reacción k	100	MPa/m
	Espesor de la subbase	15	cm
	Módulo de elasticidad	2800	MPa
	Resistencia Crítica	$10,34 \times 10^{-2}$	MPa
	Desplazamiento a la falla	0.00254	cm
Cemento	Índice de Fineza Blaine	370	m ² /kg
	Tipo de Cemento (ASTM)	I	
Mezcla y componentes	Tipo de Agregado	Silicio	
	Aditivos (ASTM C 494)	No	
	Fly Ash	No	
	Relación Agua/Cemento	0.397	
Composición de la mezcla	Agregados Gruesos	1175	Kg/m ³
	Agregados Finos	665	Kg/m ³
	Agua	135	Kg/m ³
	Cemento (Tipo I)	340	Kg/m ³
	Peso Total	2315	Kg/m ³
Propiedades Resistentes	Forma de caract de resit	Flex en 3 Pos	
	Resistencia a 28 días	5.000	kPa
	Módulo a 28 días	33.241	MPa
	CTE (Coef Dilat Térmica)	13	microstrains/°C
	Incluye contracción	Si	

En el análisis se ha valorado la influencia de distintas variables. El conjunto de simulaciones efectuadas ha sido dividido en grupos:

- **Grupo 1. Simulación de condiciones de obra.** Implica la valoración de las variables relacionadas con materiales y métodos constructivos empleados en obra, así como a la reproducción de las características medias de las condiciones climáticas del período de hormigonado (verano).
- **Grupo 2. Evaluación de la incidencia del agregado.** Las simulaciones han sido realizadas, aplicando, en fallas detectadas en el grupo anterior, una modificación en las características del agregado, en particular se ha variado el coeficiente de dilatación térmica.
- **Grupo 3. Evaluación de la incidencia de otros factores intervinientes.** Para casos de falla del grupo 1, se ha valorado la influencia de las dimensiones de la losa, la condición de apoyo, el tipo de cemento, la temperatura de colocación del hormigón.

Las modelaciones han sido realizadas para distintas condiciones climáticas. El modelo representa las condiciones climáticas a través del uso de tres variables: la temperatura ambiente, la humedad y el viento. En este sentido, se han simulado dos situaciones, consideradas representativas: condiciones climáticas de primavera y de verano. Las variaciones entre ambas han sido planteadas a nivel de las

temperaturas ambientes, la humedad ambiental y la velocidad del viento como se mencionara anteriormente. Los principales indicadores del conjunto de variables consideradas son los indicados en la Tabla 2.

Tabla 2. Parámetros característicos de la condición climática

Estación	Temp Ambiente (°)		Humedad Amb (%)		Viento (km/hr)	
	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín
Primavera	26	17	85	35	15	3
Verano	35	18	85	40	25	3

Otro aspecto de importancia en la definición de la simulación es la fijación de las temperaturas del hormigón y del material de apoyo de la losa en el momento del hormigonado. Los valores adoptados han sido:

- a) Temperatura del hormigón, en primavera 22 °C, en verano 27 °C;
- b) Temperatura del suelo cemento de apoyo, en primavera 25 °C, en verano 30 °C.

Finalmente, y en relación con el momento de colocación del hormigón, respecto de las horas del día se han realizado simulaciones con tres horas diferentes: mediodía (13:00 hs), tarde (18:00 horas) y noche (22:00 horas).

Los resultados obtenidos permiten algunas observaciones de interés:

- Hormigonando en primavera, se aprecia que las condiciones de falla se producen, fundamentalmente, cuando el hormigonado se inicia al mediodía. Se aprecia que las situaciones de falla se dan después de las 15 horas de hormigonado, aproximadamente, permitiendo interpretar que el material ha sufrido en las primeras horas de vida una superposición de tensiones generadas por las temperaturas ambientales y las generadas por el fragüe.
- La modelaciones en tiempo caluroso (verano), muestran mayor cantidad de situaciones en las cuales ocurren relaciones de tensiones resistentes inferiores a las solicitantes. Según las simulaciones efectuadas, sólo los hormigonados en forma nocturna pueden tener un buen desempeño en la evolución de los estados tensionales. Cabe acotar que durante los relevamientos efectuados, en los cuales se observaron losas hormigonadas a distintos horarios, aquellas construidas en las últimas horas del día muestran, al cabo de un año de vida, fisuras dispersas y especialmente efectos de peladura en superficie. Una situación típica de falla modelada es la indicada en la Figura 1.

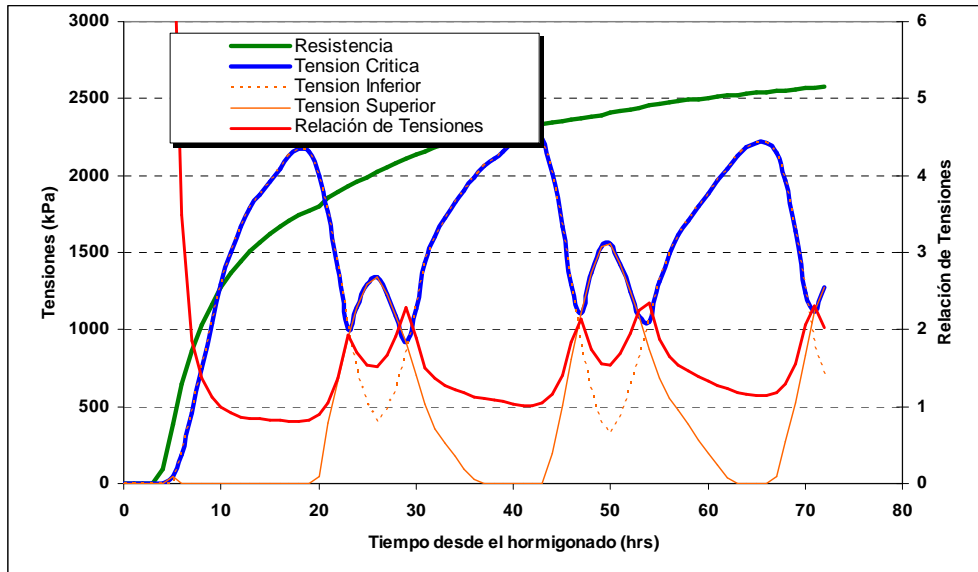


Figura 1. Modelación de relación Resistencia – tensiones de tracción en período inicial de hormigón. Hormigonado al mediodía de estación verano

En el marco de las modelaciones del grupo 2, se simuló el comportamiento de un agregado con coeficiente de expansión térmica de $9,0 \times 10^{-6} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$, es decir con un 70% del valor originalmente empleado. El valor adoptado en este grupo se corresponde con las características típicas de basaltos. Algunas observaciones derivadas de estas modelaciones son presentadas a continuación:

- En los climas de primavera, cualquiera de las situaciones planteadas muestra una sensible mejora con la utilización de agregados con bajo coeficiente de expansión térmica.
- En condiciones de clima de verano, se produce una ligera mejora en los resultados, siempre que la humedad sea elevada y no se registren valores importantes de viento.

Dentro del grupo 3, se ha realizado la revisión de la influencia de diversas variables. Las variables de influencia consideradas y los resultados obtenidos son:

- **Dimensiones de la losa.** Se ha simulado una losa con dimensiones mínimas desde el punto de vista de los usos frecuentes en los usos viales. La superficie considerada es de 3,50 metros en el sentido longitudinal y 3,65 metros en sentido transversal. El razonamiento teórico del comportamiento muestra que la acción propuesta reduce el volumen de material que sufre las variaciones volumétricas, con lo que los desplazamientos de contracción son inferiores, y por consiguiente, las tensiones de tracción ocasionadas. Los resultados muestran una mejora en el comportamiento de la losa, sin embargo, en verano esta acción no es suficiente para evitar la fisuración luego de 11 horas del hormigonado.
- **Resistencia friccional de la capa de apoyo.** Se ha simulado el comportamiento de la losa considerando que por debajo de ella se localiza una capa de baja fricción (concreto asfáltico, geosintético, etc.). Los resultados muestran una sensible mejora en el comportamiento, al punto de permitir la contracción de hormigón, eliminando la formación de fisuras en todos los escenarios planteados.

A modo de ejemplo de los resultados obtenidos, la Figura 2 presenta las evoluciones de resistencias y solicitaciones.

- **Sistema de protección en el período de curado.** Se ha considerado un sistema de protección superficial, formado por una triple capa de protección. Los resultados muestran mejoras que no alcanzan para evitar la fisuración de la estructura.
- **Tipo de cemento.** Se ha realizado una modelación empleando un cemento con una superficie específica de 300 m²/kg. Se entiende que, bajo estas condiciones el gradiente térmico del hormigón en el fragüe es menor respecto de las situaciones inicialmente planteada. Se aprecia una mejora respecto de la situación inicial, aún cuando no se alcanza a controlar totalmente la posibilidad de formación de fisuras.
- **Temperatura inicial del hormigón.** Se muestra como una variable de alta incidencia en el comportamiento posterior del material. Se interpreta que la baja temperatura inicial del hormigón (simulado con un valor de 10 °C) es ayudada en su mantenimiento, o en el desarrollo de un lento incremento térmico, a través de un adecuado sistema de control térmico superficial. A modo de ejemplo de los resultados obtenidos, la Figura 3 presenta las evoluciones de resistencias y solicitaciones.

La Tabla 3 resume los resultados obtenidos.

Tabla 3. Resultado de simulación para análisis de influencia de variables

Variable de Influencia considerada	Mínima Relación Tensiones	Hora a la Falla	Horas desde Hormigonado	Observación
Dimensión Losa	0.90	12:00:00 a.m.	11.00	Fisura
Fricción con subbase	1.38			Sin falla
Protección Superficial	0.85	1:00:00 a.m.	12.00	Fisura
Tipo de cemento	0.72	2:00:00 p.m.	14.00	Fisura
Temperatura de la Mezcla	1.04			Sin falla

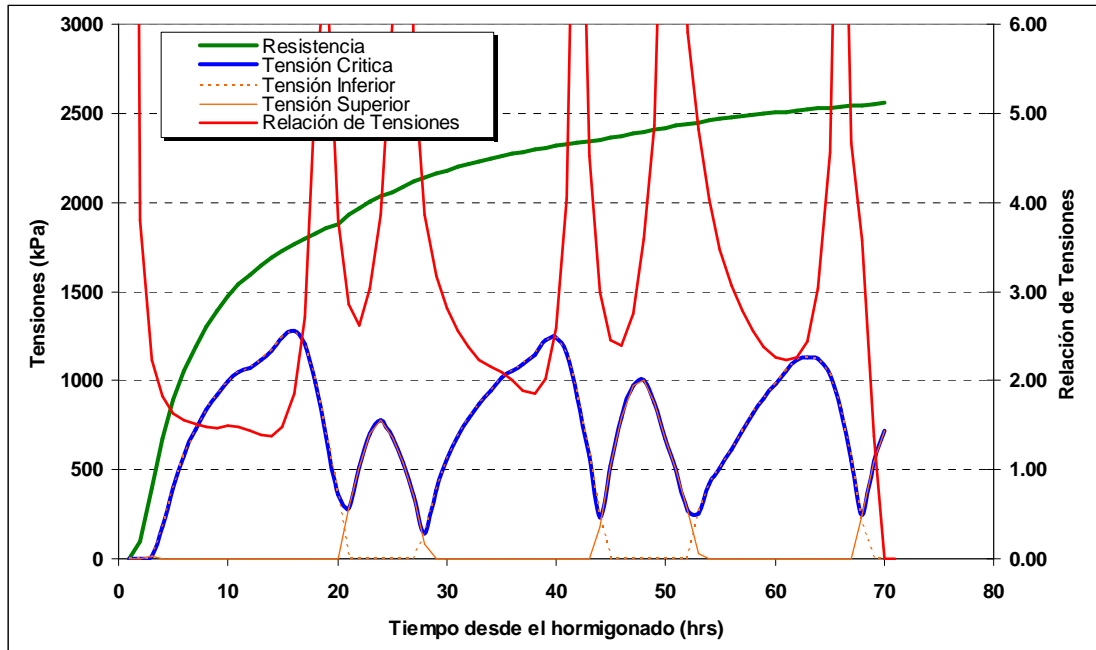


Figura 2. Evolución de tensiones, para sistemas con baja fricción en el apoyo de la losa

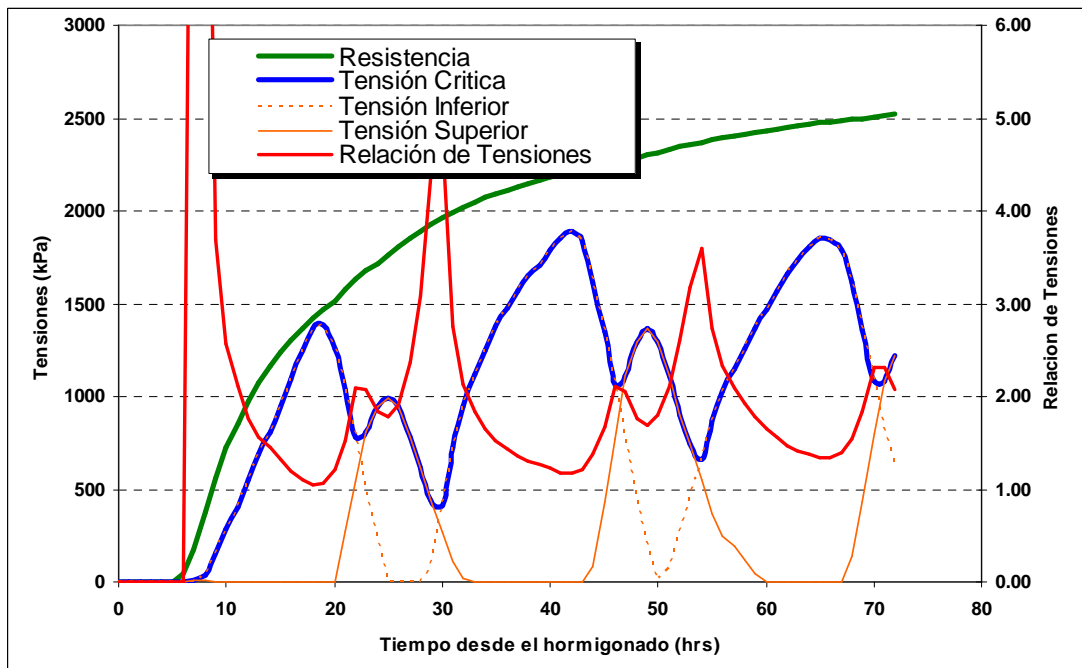


Figura 3. Evolución de tensiones para influencia de la temperatura inicial del hormigón

Finalmente, se ha realizado la modelación de una situación considerada de aplicación para las condiciones de hormigonado en clima caluroso a fin de permitir lograr una adecuada evolución de las variables resistentes en relación con las solicitantes. Las condiciones de cálculo han sido:

- Coeficiente de expansión térmica igual a $10 \times 10^{-6} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$, lo cual implica la utilización en forma parcial o total de otros agregados diferentes de los empleados en la obra.
- Temperatura inicial del hormigón de $18 \text{ } ^{\circ}\text{C}$, procurando el desarrollo de procesos de control de los efectos climáticos sobre la evaporación superficial.
- Cemento con blaine de $330 \text{ m}^2/\text{kg}$, a fin de reducir el calor de hidratación propio del cemento.
- Dimensión de paño, reduciendo el espaciamiento entre juntas transversales, por lo que la dimensión de la losa es igual a $3,50 \text{ metros} \times 4,25 \text{ metros}$.

La Figura 4 muestra que para los parámetros antes indicados se obtiene una adecuada respuesta de la evolución de las resistencias.

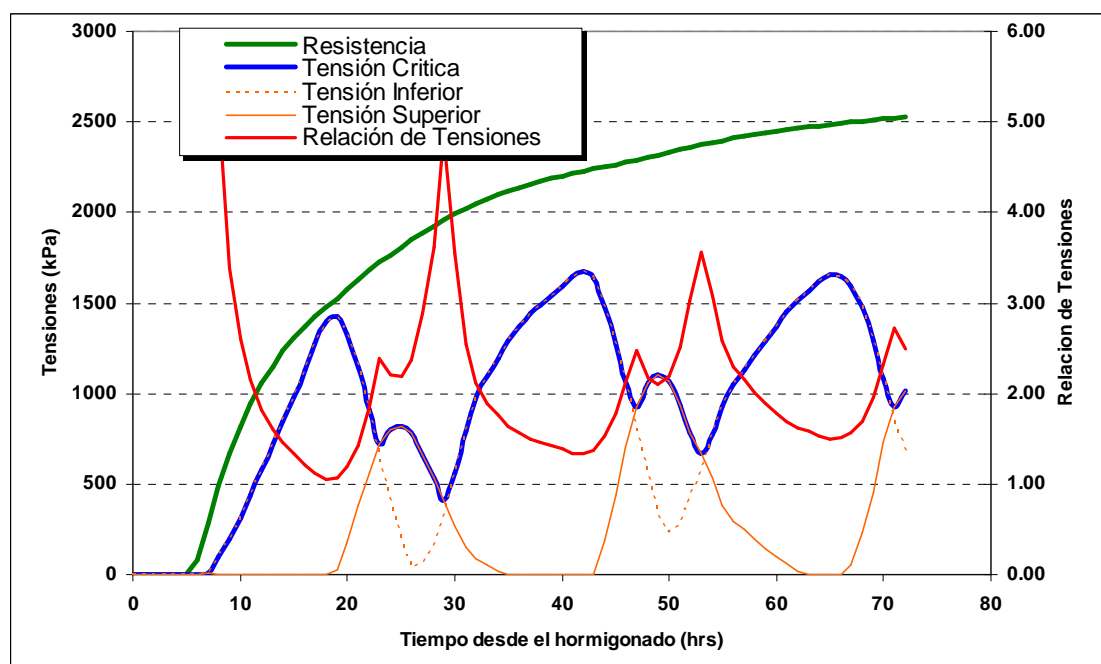


Figura 4. Evolución de las relaciones de tensiones. Situación "ideal" en clima caluroso

4. Deterioros en el Hormigón Endurecido

Se han considerado dos formas de deterioro de interés dentro de este grupo. Por una parte, los efectos generados por las características propias del suelo apoyo de la estructura, y por otro lado los efectos térmicos. Los aspectos sobresalientes de cada caso se comentan a continuación.

Influencia del Suelo de Apoyo

La influencia de este factor se ha observado en sectores en los cuales, los terraplenes de suelos arcillosos adquieren mayor altura y se encuentran con una alta exposición a un doble proceso: por una parte, de consolidación por su propio peso, y por otro lado, de variación volumétrica por presencia de fuentes de inundación próximas. La Fotografía 2 muestra este tipo de situaciones. En parte del terraplén de

acceso al intercambiador las fisuras presentan escalonamientos del orden de 15 mm.

Cabe resaltar en este caso, que los taludes definidos para terraplenes de gran altura deben ser adecuadamente definidos en función del tipo de material que compone el terraplén. En particular, los efectos combinados de la variabilidad volumétrica del suelo arcilloso, junto con la baja estabilidad del talud ante incrementos en la humedad del suelo que lo compone, se suman en estos casos.



Fotografía 2. Desarrollo de fisura longitudinal por influencia del suelo de apoyo.

Puntualmente se observan fisuras en esquina. Las fisuras en esquina cortan a las juntas transversales y las longitudinales en, aproximadamente, 45° , respecto de los ejes de la calzada. En general, pueden atravesar todo el espesor de la losa, en la obra se observan en forma aislada. La Fotografía 3 muestra un ejemplo típico de este tipo de deterioro. Los factores que contribuyen en forma complementaria a esta forma de fisuración son: problemas en la base, sobrecarga, espesor de losa insuficiente, falta de transferencia de las cargas en todo el conjunto, deficiencia en el curado, saltos térmicos.



Fotografía 3. Fisuras en esquina de losa

Efectos Térmicos

Con la finalidad de interpretar el comportamiento térmico de la losa del pavimento en estado endurecido se desarrollaron modelos de elementos finitos que procuran simular macro y micro situaciones. Los mismos, permiten analizar la influencia de variables, tales como el gradiente térmico variable en la altura de la losa, o condiciones de contacto parcial de la losa respecto del terreno de apoyo.

En primer lugar se elaboraron modelos básicos con un número mínimo de variables para representar el comportamiento de la losa, y luego se fueron incorporando otras variables intervinientes para determinar la influencia de cada una de ellas. Inicialmente, se modeló la losa como una viga simplemente apoyada en dos bordes que representa el modelo estructural más sencillo, y además permite comparar resultados con modelos analíticos. Luego, se incorporaron las restricciones que las capas de apoyo de la estructura del pavimento le generan a la losa. Estas restricciones se materializaron utilizando resortes elásticos en la dirección vertical, teniendo en cuenta la rigidez que aporta el sistema de capas y en la dirección horizontal para modelar la fricción resultante entre la sub base y la losa.

Dentro de este modelo se han supuesto tres condiciones de fricción a nivel de la capa de apoyo de la losa, las mismas procuran simular la influencia de la disposición de la misma sobre:

- a) suelo cemento, con la mayor resistencia friccional,
- b) concreto asfáltico, con una resistencia friccional intermedia, y
- c) base granular, con una baja resistencia friccional.

Como caso extremo también se modeló el apoyo como si fuera infinitamente rígido, restringiendo el desplazamiento de los nudos de apoyo en todas las direcciones.

La geometría de todos los modelos desarrollados es de tipo bidimensional (Figura 5), modelando en diferentes capas el espesor de la losa con el objetivo de simular el gradiente de temperatura variable que se registró mediante las mediciones en el campo. Se utilizaron elementos planos de cuatro nudos formulados para

modelar estados planos de tensión. Aprovechando las condiciones de simetría se modeló la mitad del ancho de la losa correspondiente a la trocha lenta (4,25/2 m).

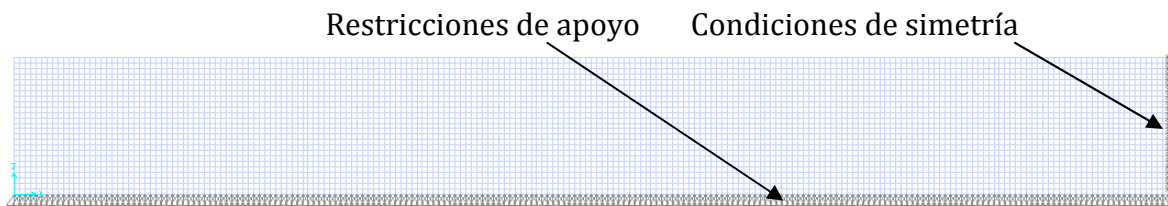


Figura 5. Modelo de Elementos Finitos

Los materiales utilizados en los modelos descritos han sido caracterizados mediante las siguientes propiedades: módulo de elasticidad, coeficiente de Poisson y coeficiente de expansión térmica. Para considerar la variabilidad de estas propiedades a edades tempranas y la variabilidad en el espesor de la losa debido a diferentes condiciones de curado se utilizó un rango de valores posible para cada variable.

Se evaluaron módulos de elasticidad comprendidos entre 20 GPa y 60 GPa, y coeficientes de expansión térmica comprendidos entre 9.9×10^{-6} y 1.3×10^{-5} $1/^\circ\text{C}$. En todos los casos se adoptó un coeficiente de Poisson igual a 0.20.

En relación con el estado de carga modelado, se ha considerado la aplicación de un gradiente térmico variable en altura. Este estado responde a valores medidos en campo, en referencia a las temperaturas observadas en la superficie de la losa, a 2 cm de profundidad, y en el fondo de la losa. La Tabla 4 resume las temperaturas consideradas en cada situación.

Tabla 4. Distribución de temperaturas en la losa de hormigón modelada

Posición	Temperatura en el Día ($^\circ\text{C}$)	Temperatura en la Noche ($^\circ\text{C}$)
Superficie	60	15
A 2 cm	45	25
Fondo de losa	25	25

Los resultados del análisis de los dos gradientes de temperatura sugieren que el gradiente crítico en función de las tensiones de tracción que se generan en la losa sería el nocturno.

La Figura 6 muestra el contorno de tensiones que se genera al aplicar el gradiente de temperaturas nocturno al modelo de la viga simplemente apoyada. Puede apreciarse que las tensiones se concentran en los 2 cm superiores del pavimento en coincidencia con la caída de la temperatura. En el borde superior se producen las tensiones máximas de tracción que tienen un valor de 28.5 kg/cm^2 para el modelo simplemente apoyado y con apoyo fijo y 31.0 kg/cm^2 para el modelo elástico.

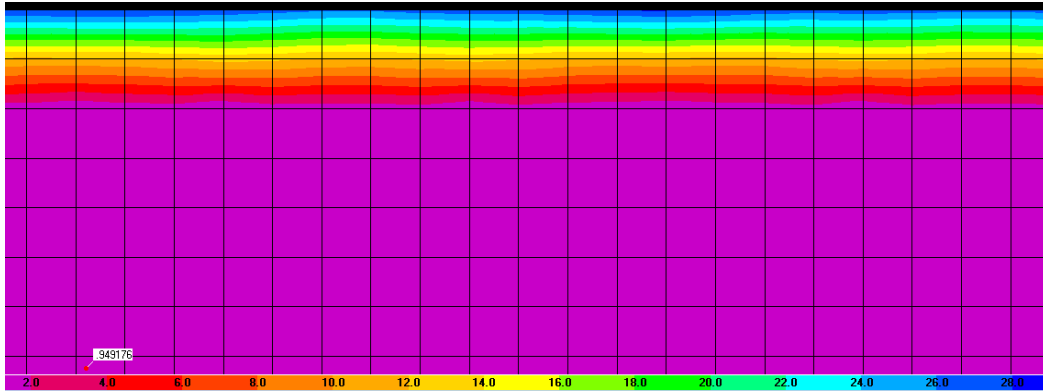


Figura 6. Tensiones en el pavimento debido al gradiente de temperaturas nocturno [kg/cm²]

Las tensiones generadas en los primeros 2 cm de la losa al aplicar el gradiente nocturno son cercanas a la resistencia a tracción del hormigón y por lo tanto, existe la posibilidad que se produzcan fisuras en la superficie de la losa.

También se desarrolló un modelo con fisura incorporada. La finalidad de este modelo fue evaluar un posible progreso de las fisuras. Para esto, se incorporó a los modelos anteriores fisuras discretas de 2 cm de profundidad desde la superficie ubicadas en el centro y en los cuartos de la losa. Estas fisuras se simulan desconectando los nudos de un par de elementos adyacentes. La Figura 7 muestra la deformada del modelo en la zona de la fisura en la que se aprecia la separación de los nudos.

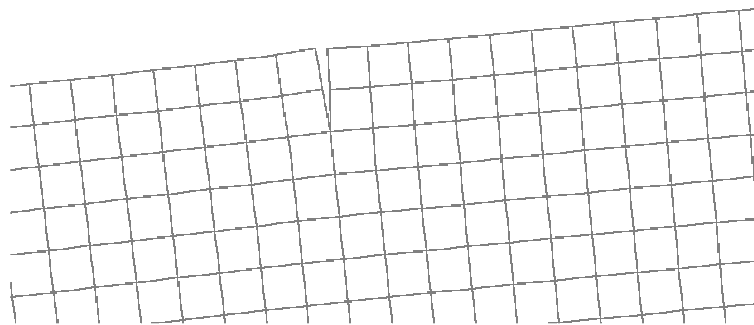


Figura 7. Deformada del modelo en la zona de la fisura

Finalmente se confeccionó un modelo para estudiar el comportamiento a nivel local de la interacción entre el agregado y la pasta cementicia. Este modelo consiste en un cuadrado de 5 cm x 5 cm compuesto de pasta cementicia rodeando a un círculo interno de 3 cm de diámetro que representa al agregado. Las condiciones de vínculo de este modelo consisten en un apoyo fijo en el extremo izquierdo y un apoyo móvil en el extremo derecho. Estos apoyos permiten que el modelo se deforme libremente cuando se lo somete a las acciones térmicas. De esta manera es posible evaluar la interacción agregado-pasta cementicia sin la influencia de otros factores. La Figura 8 muestra las características del modelo elaborado.

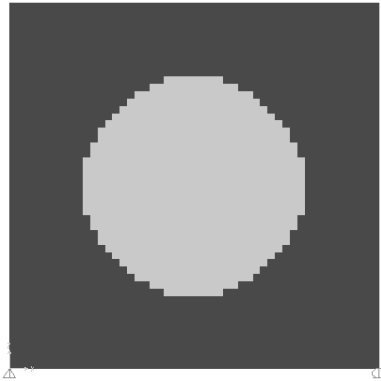


Figura 8. Modelo local agregado-pasta cementicia

A nivel del conjunto de resultados obtenidos pueden efectuarse las siguientes consideraciones:

- **Concentración de tensiones en sectores con fisuras.** Las tensiones generadas en los primeros 2 cm de la losa al aplicar el gradiente nocturno son cercanas a la resistencia a tracción del hormigón y por lo tanto, existe la posibilidad que se produzcan fisuras en la superficie de la losa. En la Figura 9 se muestran las tensiones máximas que se generan en la punta de la fisura obtenidas con el modelo con fisura incorporada descrito. Las tensiones en la punta de la fisura alcanzan un valor máximo de 19 kg/cm^2 .
- **Respecto de los resultados obtenidos con el modelo local pasta cementicia – agregado,** la Figura 10 muestra la distribución de tensiones máximas cuando se aplica un incremento de temperatura. Las tensiones máximas de tracción, del orden de 20 kg/cm^2 , se producen en el contorno externo al agregado grueso (contorno verde). Considerando que la interfase entre el agregado grueso y la pasta cementicia es un zona débil del material compuesto, se podrían generar microfisuras rodeando a los agregados pétreos, y a posteriori, la acción de tensiones reversibles por inversión de los gradientes de temperatura podría provocar la pérdida de adherencia completa entre la pasta cementicia y el agregado pétreo, en detrimento de las propiedades mecánicas del material compuesto hormigón.

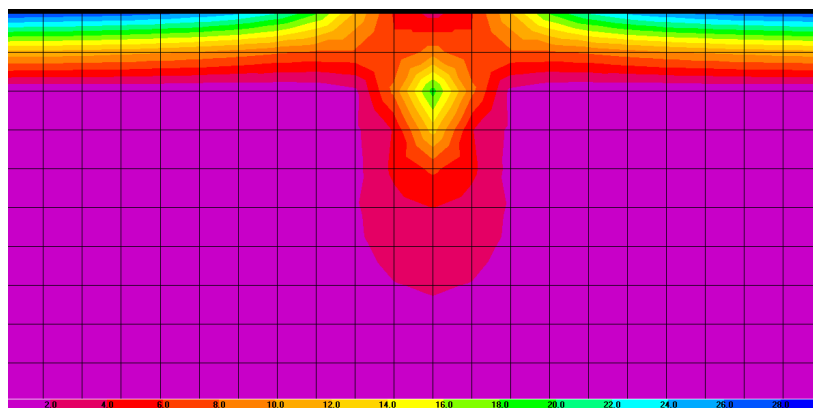


Figura 9. Tensiones en el pavimento [kg/cm2]

Gradiente Nocturno – Fisura de 2 cm

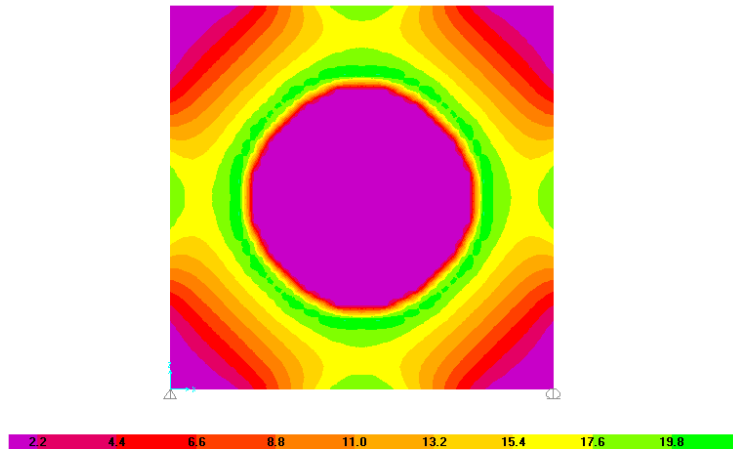


Figura 10. Tensiones máximas a nivel local debido a un incremento de la temperatura [kg/cm²]

5. Consideraciones Finales

Las experiencias obtenidas a través de la revisión de los casos observados y sus correspondientes simulaciones, han permitido identificar un conjunto de aspectos que influyen en forma significativa en los diseños de estas estructuras. Los mismos parecen tener especial incidencia, cuando se conjugan en una situación regional y climática como la aquí presentada (climas de altas temperaturas, humedad y potenciales modificaciones térmicas importantes). Algunos de los aspectos que se consideran de interés son:

- En relación con el cemento:
 - Usar cemento con la menor temperatura inicial posible. La temperatura del cemento tiene un efecto menor que los otros componentes debido a su bajo calor específico y cantidad relativamente pequeña. Un cambio de temperatura del cemento de 5 °C, generalmente, va a cambiar la temperatura del hormigón sólo 0.5 °C.
 - No se debe utilizar cemento de alta resistencia inicial o aditivos químicos aceleradores, utilizar cementos preferentemente de moderado o bajo calor de hidratación. Cabe consignar en este punto, que las consideraciones en relación con el efecto de la superficie específica del cemento, han sido realizadas con un criterio teórico, sin valorar en forma expresa, las características particulares de los materiales disponibles en mercado.
 - Reducir el contenido de cemento de la mezcla a los mínimos requeridos para cumplimentar las exigencias de resistencia.
- En relación con los agregados:
 - Emplear en forma total o parcial, agregados con un bajo CET. Optimizar con los materiales componentes y una adecuada dosificación un hormigón con bajos: coeficiente de expansión térmica y contracción. Trabajos previos muestran que pavimentos construidos limitando el uso del canto rodado cuarzoso al 50% se han comportado satisfactoriamente (Violini, et al., 2008). Se recomienda como forma de evaluación la aplicación del método ASTM 157.

- Mantener los acopios de agregados a la sombra, y refrigerarlos por humedecimiento con agua en forma de niebla para reducir su temperatura.
- En relación con el agua de mezclado:
 - Las acciones que demanda la teoría en relación con este aspecto implican: refrigerar el agua de mezclado, o emplear hielo en reemplazo, parcial o total, del agua de mezclado.
 - Estas acciones, de aplicación en procesos de hormigonado localizado, pueden demandar costos o procesos de elaboración incompatibles con las características propias de este tipo de obra. En tal sentido, los efectos beneficiosos de la reducción de la temperatura, deberían ser compensados con acciones complementarias, tales como la reducción de la fricción en el contacto losa – subbase, variar la dimensión de la losa, etc.
- En relación con las instalaciones:
 - Mantener a la sombra o aislados térmicamente o pintados de blanco o de color claro a los silos, tolvas, depósitos y cañerías que conducen el agua de mezclado, y al tambor de la hormigonera. Se entiende que estas acciones hacen a la buena práctica de la disposición de estas instalaciones, siendo las mismas cumplidas en forma integral durante el desarrollo de la obra.
- En relación con el uso de aditivos:
 - Se puede utilizar un aditivo retardador del tiempo de fraguado, fluidificante y retardador o superfluidificante y retardador del tiempo de fraguado del hormigón. Estos aditivos permiten compensar la aceleración del fraguado producida por la mayor temperatura del hormigón, pero no son de aplicación para resolver otros efectos térmicos desfavorables. En estos casos la dosis de retardador se debe ajustar en función de las variaciones en la temperatura de colocación del hormigón.
- En relación con la definición geométrica de los componentes del pavimento:
 - Determinar en forma experimental el calor de hidratación de la mezcla utilizando un calorímetro (según la norma ASTM C 186).
 - Con los datos obtenidos experimentalmente y los antecedentes climáticos, realizar los cálculos de espaciamiento de juntas, gradiente térmico máximo admisible, espesor, etc.
 - Si el espesor de la losa es de 25 cm la separación entre juntas longitudinales debería ser inferior a los 3,50 metros. Al mismo tiempo, y a los fines de reducir la fricción con la subbase, debería preverse la disposición de una capa que presente un factor de fricción inferior al generado por el suelo cemento. En este sentido, factores sensiblemente inferiores pueden lograrse con capas de concreto asfáltico, o con granulares estabilizados.
- En relación con la Colocación del Hormigón.
 - Temperaturas del Hormigón. Las recomendaciones efectuadas respecto de la temperatura máxima del hormigón, a nivel del Pliego de Especificaciones muestran que antes de superar la temperatura de 30 °C, para el resto de las variables intervinientes en el problema, existía una alta probabilidad de someter al material a estados tensionales superiores a su resistencia. En relación con este punto, se han efectuado modelaciones complementarias a las antes indicadas, considerando una temperatura inicial del hormigón de 32 °C, e iniciando el hormigonado a las 13:00 horas. Se han planteado dos

combinaciones de variables que permiten desarrollar resistencias por encima de las solicitaciones en las primeras horas de vida del material. Las soluciones planteadas son:

- Escenario 1. Losa de 4,25 metros por 3,50 metros. Cemento con blaine de 330 m²/kg. CET de los agregados 10x10⁻⁶ 1/°C. Subbase de suelo cemento.
- Escenario 2. Losa de 4,25 metros por 4,50 metros. Cemento con blaine de 370 m²/kg. CET de los agregados 13x10⁻⁶ 1/°C. Subbase de concreto asfáltico.

Los resultados obtenidos resultan satisfactorios, aún para las condiciones climáticas propuestas y la temperatura inicial del hormigón. Es de hacer notar que los escenarios propuestos implican la utilización de losas de hormigón de menores dimensiones con agregados menos sensibles a las variaciones térmicas, o de mantener estas condiciones iniciales de construcción, se hace necesario reducir sensiblemente la fricción en el contacto entre la losa de hormigón y la base de apoyo.

- Establecer experimentalmente o con datos de campo, el límite máximo de temperatura, humedad y velocidad del viento, en base a pruebas de mezclas tipos y para el espesor de la sección establecida. Realizar las experiencias con volúmenes de mezclas grandes con el objeto de medir las propiedades en intervalos de tiempo, estableciéndose la relación de la propiedad de interés en función del tiempo en varias temperaturas de mezcla. Este proceso también permite establecer el tiempo máximo permitido para: la entrega y los trabajos de acabado superficiales del hormigón.

Finalmente es necesario destacar que varias de las recomendaciones aquí formuladas no se encuentran totalmente contempladas en los Pliegos de Especificaciones generales de construcción, mostrando la conveniencia de ejecución de reconocimientos específicos de los comportamientos esperados, a fin de reducir la potencialidad de desarrollo de los efectos observados.

6. Referencias

- AASHTO'93. (1993). AASHTO Guide for Design of Pavement Structure.
- ACI 305 R-99. (1999). "Hot weather concreting, curing and protection 4.4.
- ASTM 157 "Test Methods for length change of hardened hydraulic-cement mortar and concrete"
- CIRSOC 201. (1982). "Proyecto, Calculo y Ejecución de Estructuras de Hormigón Armado y Pretensado.
- FHWA. Federal Highway Administration (2003). Distress Identification Manual for the Long Term Pavement Program. Publication N° FHWA RD 031.
- FHWA (2005). Computer-Based Guidelines for Concrete Pavements, Volume II: Design and Construction Guidelines and HIPERPAV® II User's Manual. PUBLICATION NO. FHWA-HRT-04-122 FEBRUARY 2005.
- FHWA (2007). Integrated Materials and Construction Practices for Concrete Pavement: A State-of-the-Practice Manual. FHWA HIF - 07 – 004.
- PCA (1995). Thickness Design for Concrete Highway and Street Pavements. Portland Cement Association.

TRB (2006). E-C107. Control Of Cracking In Concrete. State Of The Art. Transportation Research Board. Basic Research And Emerging Technologies Related To Concrete Committee. October 2006.

Violini, D., Pappalardi M., Tobes, J. M., Giaccio, G. y Zerbino, R. Efecto del Tipo de Agregado sobre la Tendencia a la Fisuración a Edad Temprana en Hormigones para Pavimentos. III Congreso Internacional 17ª Reunión Técnica "Ing. José Fermín Colina".

Agradecimientos.

Los autores agradecen especialmente al personal técnico de la Empresa J.J. Chediack, y en particular al Ingeniero Javier Chasco, por el aporte de la información de campo empleada en el desarrollo del presente estudio, y por su permanente preocupación por el aporte de elementos que contribuyan al buen hacer de la construcción de pavimentos con estos componentes.