

Comportamiento térmico de un hormigón de alta resistencia⁽¹⁾

ENRIQUE MIRAMBELL (*)
JOAO LUIZ CALMON (**)
ANTONIO AGUADO (*)

RESUMEN Con motivo de la celebración de los Juegos Olímpicos en Barcelona se proyectaron y construyeron dos pasarelas peatonales pretensadas con hormigón de alta resistencia. Durante la construcción de las mismas se tomaron medidas de temperatura en diferentes puntos del tablero. En este artículo se presenta un estudio teórico relativo a las distribuciones de temperaturas y de tensiones térmicas asociadas inducidas en estructuras de hormigón de alta resistencia durante el proceso de fraguado y endurecimiento. La comparación entre los resultados de temperatura experimentales y los derivados del modelo numérico desarrollado permite caracterizar el hormigón de alta resistencia desde un punto de vista térmico, obteniendo su curva de evolución de temperatura durante el proceso de hidratación. Los resultados del estudio térmico y tensional de las pasarelas muestran que las distribuciones de temperatura son fuertemente no lineales, ocasionando la aparición de tensiones de tracción significativas en las superficies externas de las pasarelas durante el proceso de fraguado del hormigón de alta resistencia.

HEAT OF HYDRATION IN HIGH-STRENGTH CONCRETE

ABSTRACT Two pedestrian bridges located in the Olympic Area of Barcelona were constructed with high-strength prestressed concrete. During construction, measurements of the temperature in several points within the superstructure of the pedestrian bridge were carried out. In this paper, a theoretical study about temperature and stress distributions induced in high-strength concrete structures during the hardening process is presented. A comparison between actual and analytical results of temperature allows the determination of the evolution of hydration heat of high-strength concrete. The analytical model developed, capable of predicting temperature distributions and stress distributions is based on the 3-D finite element method. The results derived from thermal analysis show that temperature distributions, are strongly nonlinear at early ages. Due to this fact, significant tensile stresses might appear at the external surface of the superstructure during the hardening process.

Palabras clave: Hormigón de alta resistencia; Calor de hidratación; Gradiente térmico; Tensiones térmicas; Fisuración.

1. INTRODUCCIÓN

En el proyecto y construcción de estructuras de hormigón de alta resistencia, usualmente, se piensa en estructuras esbeltas de pequeñas secciones transversales, lo cual responde, lógicamente, al beneficio que reporta las altas resistencias en la reducción de secciones de elementos sometidos principalmente a compresión.

Ahora bien, aunque exista esa reducción de secciones pueden presentarse elementos estructurales concretos que requieran unas dimensiones transversales significativas, considerando como tales, a estos efectos, valores superiores a los 80 cm. Esta circunstancia, añadida a las altas dosificaciones de cemento y microsilíce que usualmente comportan estos hormigones, pueden conducir a incrementos importantes de la temperatura durante las primeras horas de estos hormigones.

Las distribuciones de temperaturas existentes durante dicho período en una sección genérica teniendo en cuenta las condiciones ambientales presentan un marcado carácter no lineal, lo cual comporta la aparición de tensiones internas autoequilibradas. Como es bien conocido, si estas tensiones superan la respuesta del hormigón a esa edad (resistencia a tracción), se producirán fisuras en el elemento estructural, lo cual, evidentemente, no es deseable.

Una situación similar a la planteada era la que se podía presentar en la construcción de unas pasarelas en Montjuïc (Barcelona), realizadas con un hormigón de alta resistencia (H-800). En dichas pasarelas, tal como se describe con posterioridad, existían elementos con espesores de 80 cm y la da-

(1) Este artículo responde en gran medida a la comunicación titulada "Heat of Hydration in High Strength Concrete. Case Study", la cual fue presentada por los autores en el Third International Symposium on Utilization of High-Strength Concrete, Lillehammer (Noruega), Junio 1993, patrocinado por NBS, SINTEF, NSF, FIP, CEB, ACI.

(*) Catedrático de Universidad, Departamento de Ingeniería de la Construcción, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona, UPC.

(**) Profesor Asociado, Universidade Federal do Espírito Santo/CNPq, Vitória, Brasil.

sificación empleada tenía cantidades de cemento y microsilice superiores a las usuales.

El presente artículo tiene por objeto presentar los resultados del análisis térmico-tensional realizado para dichas estructuras mediante la técnica de los elementos finitos en dominios tridimensionales. Los resultados numéricos obtenidos en el modelo pudieron ser contrastados con los resultados registrados en las medidas realizadas sobre las propias estructuras, mostrando la bondad de los mismos.

2. DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA

2.1. SOLUCIÓN ADOPTADA

Con motivo de la celebración de los Juegos Olímpicos en Barcelona, se construyeron diferentes instalaciones deportivas ubicadas en el anillo olímpico de Montjuïc. Ello conllevaba la necesidad de dar acceso desde la Plaza de España a dichas instalaciones deportivas. Tras diferentes estudios de soluciones se consideró que una de ellas fuese un rosario de escaleras mecánicas, cuidadosamente integradas en un territorio de calidad como es el que se ubica entre la Fuente Mágica y el Palacio Nacional. El primer escalón de esa solución lo constituyen dos pasarelas peatonales que atraviesan la calle Rius y Taulet, salvando el desnivel existente entre la plataforma que rodea a la Fuente

Mágica y la Avenida de la Reina M^a Cristina. Dichas pasarelas fueron proyectadas por Javier Rui-Wamba, Beth Galí y Jaume Benavent como estructuras de hormigón pretensado con un hormigón de alta resistencia, característica, de 80 MPa. La construcción de las mismas, realizada por Fomento de Construcciones y Contratas, se desarrolló fundamentalmente en el otoño de 1991. En lo que sigue se presenta de forma breve los datos principales de la solución adoptada, la cual se muestra en la figura 1. Más datos referidos a las mismas pueden encontrarse en las referencias siguientes: Rui-Wamba et al (1992), Bellod et al (1994) y Aguado et al (1994).

De la citada figura puede deducirse que en la zona central de las pasarelas, donde el momento flector positivo es máximo, la cabeza de compresión es pequeña, consecuencia de las razones de proyecto. Por ella, se requería un material que permitiese alcanzar altas resistencias. Asimismo, y dada la alta concentración de armaduras en la zona de anclaje y otras zonas era necesario un hormigón con una alta trabajabilidad. Otro factor a tener presente era la importancia de que se alcanzasen altas resistencias en los primeros días con el fin de poner en tensión la estructura permitiendo descimbrar y, en consecuencia, reducir riesgos de choques de vehículos con la cimbra ya que se permitía tráfico por debajo de la misma.

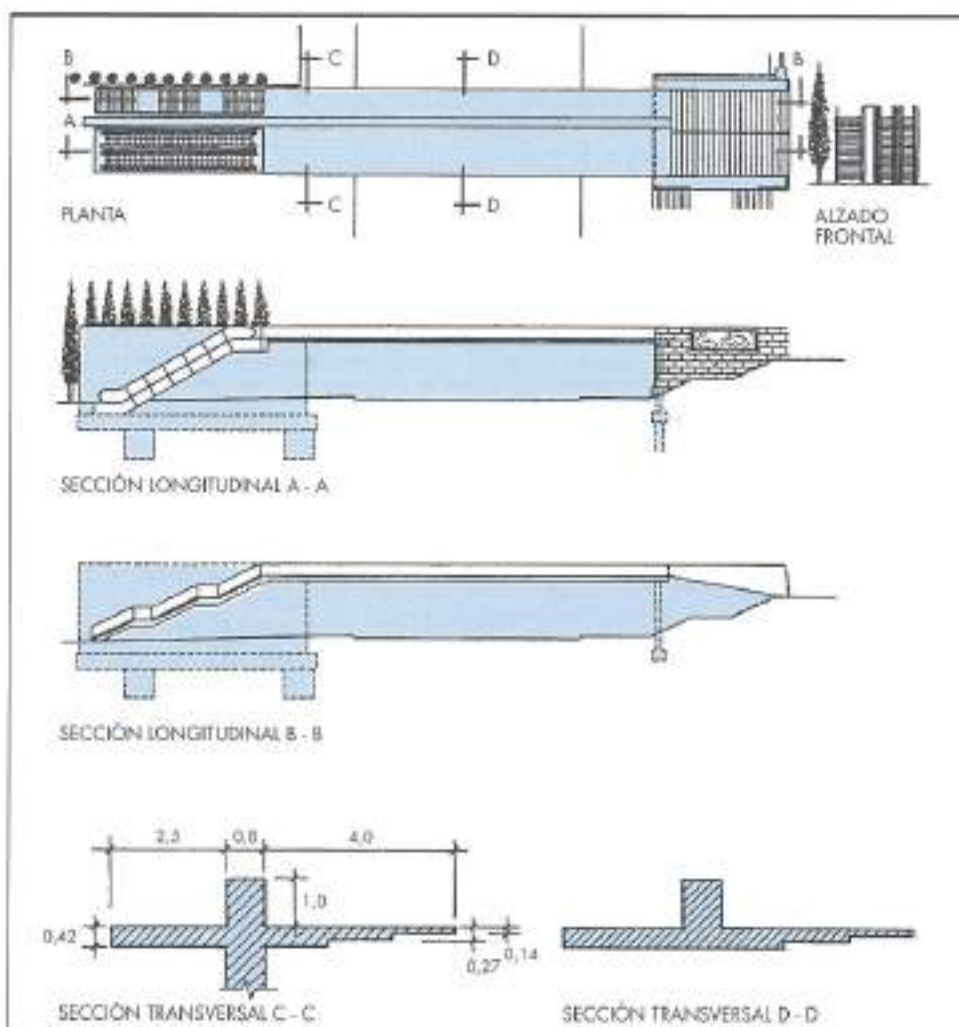


FIGURA 1. Planta y alzado de las pasarelas. Sección transversal en vano y en empotramiento al muro.

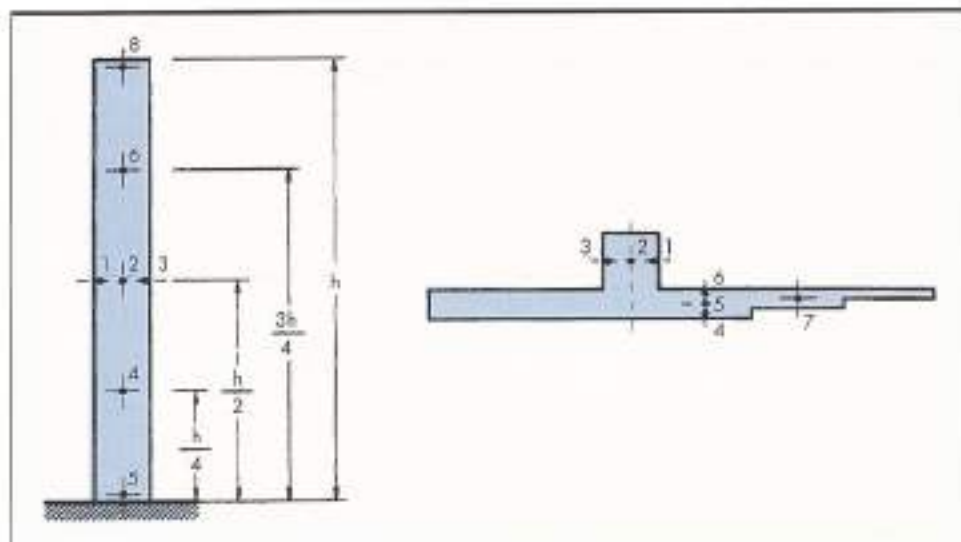


FIGURA 2. Disposición de los puntos de medida en muro (a) y tablero (b).

2.2. MATERIALES Y DOSIFICACIÓN

Aparte de las razones expuestas, hubo otro factor de gran incidencia en la elección de los materiales componentes así como en la dosificación de los mismos. Dicho factor era la urgencia en la toma de decisión sobre el hormigón tipo a emplear. Esta decisión tuvo que tomarse tras tres dosificaciones de prueba y con resultados de sólo 14 días. Hay que llamar la atención sobre el hecho de que en el momento de esta toma de decisión no existían experiencias previas en instalaciones de tipo industrial en España y muy pocas en condiciones de laboratorio.

Debido a los motivos y factores anteriormente expuestos, se procuró, desde un principio, ir a unos componentes de altas características mecánicas. Así, el cemento fue tipo I-55A de Cementos Molins, S.A., la arena (0-5 mm) era de tipo sílicea (Arenas de Barcelona, S.A.), la gravilla (5-12 mm) era de origen basáltico (Ruidarenas, Gerona), lavada después del machaqueo, y el agua, de la red urbana de los municipios donde se ubicaban las centrales.

A estos componentes se le añadió humo de sílice (microsílice) suministrado por Halesa-Master Building (Rheobuild TDS). Esta microsíllice, tras los estudios de difracción de rayos X, análisis químicos y pérdida al fuego mostraron que contenía un plastificante para facilitar su manipulación, respondiendo al tipo de microsíllice denominado densificada. Asimismo, con el fin de facilitar la trabajabilidad del hormigón y evitar problemas de incompatibilidad se empleó un superfluidificante de la misma casa (Rheobuild 1000). La dosificación empleada por m^3 fue gravilla, 980 kg, arena sílicea, 690 kg, cemento, 550 kg, microsíllice, 110 kg, agua, 185 litros y superfluidificante, 5,25 litros [Rui-Wamba et al (1992)].

Hay que llamar la atención sobre el hecho de que, en circunstancias diferentes a las que se dieron en esta obra, las cantidades de cemento y microsíllice podrían reducirse, en cierta medida, manteniendo el mismo nivel de prestaciones. Como puede verse en la dosificación, la relación agua/cemento, así como la relación agua/(cemento + microsíllice) son bajas, e iguales a 0,30 y 0,25, respectivamente. Estas relaciones tienen una influencia significativa sobre las prestaciones mecánicas del hormigón, por lo que es muy importante llevar a cabo un control de las mismas, considerando la humedad de los áridos.

En esta obra se limitó el porcentaje de humedad de los áridos a un 2%. El énfasis en este factor viene dado porque para relaciones agua/cemento tan bajas, no es directamente intercambiable el agua libre con el agua aportada por la humedad de los áridos, es decir, se requiere unas cantidades mínimas de agua libre para trabajar la mezcla.

La consistencia mínima requerida del hormigón, medida mediante el cono de Abrams, era de 20 cm en planta y 16 cm en obra. En el transcurso de las amasadas el valor del mismo varió, como es conocido, por las condiciones climáticas y humedad de los áridos; ello se tenía en cuenta para ajustar el porcentaje de superfluidificante. Dicho porcentaje varió entre el 0,3% y el 1,5%, (en función de las características de puesta en obra y las condiciones climáticas). Los resultados obtenidos en la totalidad de los casos dieron valores del cono por encima de los valores de referencia (en el entorno de 22 a 26 cm en central). Este elevado cono no supone en estos hormigones problemas de segregación debido a la tixotropía de los mismos.

3. COMPORTAMIENTO TÉRMICO DEL HORMIGÓN

3.1. CONSIDERACIONES GENERALES

Dado, por un lado, el alto contenido de conglomerante (cemento + microsíllice) y, por otro lado, el tipo y categoría del cemento (I-55-A), se entendió que se podría generar un elevado calor de hidratación tal como han puesto de manifiesto otras experiencias [Belanger y Shirlaw (1993)]. Este hecho, asociado a la geometría de los elementos (muro, tablero) podía conducir a distribuciones no lineales de temperatura que ocasionaran unas tensiones internas autoequilibradas de valores elevados, superiores a la respuesta del hormigón a la edad correspondiente y, en consecuencia, motivaran la aparición de fisuras en el hormigón.

Para analizar el comportamiento térmico de este hormigón, en obra, se midieron las temperaturas que se iban produciendo en la hidratación durante las 48 primeras horas en el caso del muro lado Palacio y las 56 primeras horas en el caso de los dos tableros. En la figura 2 se muestra la disposición de los puntos de medida tanto en el elemento tipo muro como en el elemento tipo tablero. Los puntos situados próximos al paramento se disponían atados a la ar-

madura pasiva, esto es, a unos 3-4 cm del paramento. Para registrar estas medidas se utilizaron termopares y un equipo de registro.

Con posterioridad a estas medidas se ha realizado un estudio teórico sobre la distribución de temperaturas y de tensiones producidas durante este proceso de hidratación. Para este estudio se ha utilizado un modelo numérico que utiliza el método de los elementos finitos en tres dimensiones, contrastando los resultados derivados del mismo con los obtenidos experimentalmente.

3.2. MEDIDAS REALIZADAS

En el muro lado Palacio se registró la evolución de las temperaturas de las sondas señaladas en la figura 3. Este registro se hizo desde las 20 horas 12 minutos del día 8 de noviembre de 1991 hasta las 20 horas 12 minutos del día 10 de noviembre. Esto es, se midieron las temperaturas durante 48 horas. Este registro se realizó cada hora dentro del intervalo citado.

En la figura 3 puede verse el registro de temperaturas de cada una de las sondas. En ella no aparece el registro de la sonda n° 4 correspondiente a la cota 1/4 de la altura del muro, ya que en la misma se cortó el hilo del termopar durante el hormigonado. La temperatura ambiente de ese período, partiendo de una temperatura inicial de 11°, se situó dentro del intervalo comprendido entre los 7° C y 15° C.

En esta figura 3 puede verse que todas las sondas reflejan un período amplio de tiempo en el inicio de la ganancia de temperaturas y que esta evolución parece reflejar dos tipos de reacciones exotérmicas; una primera reacción con un incremento de unos 10° C en el entorno de las 3 horas tras la colocación del hormigón (posiblemente en el fraguado del cemento) y una segunda reacción con un incremento notable de temperatura (entre 40° C y 55° C).

Una vez alcanzada la máxima temperatura, unas 12-14 horas después de colocado el hormigón, el descenso de temperaturas es suave, si bien puede venir influido por una ma-

yor superficie de transferencia como es en el caso de la sonda situada en la zona superior del muro con un descenso más rápido.

Por otro lado, en la citada figura 3 también se observa que para las tres sondas situadas en la misma cota (mitad de altura), la sonda central alcanza algo más de temperatura, que las correspondientes a las sondas situadas próximas a los paramentos. Ello es debido a que estas pueden disipar la temperatura más fácilmente a través del encofrado mientras que la sonda central estará más próxima a condiciones cuasi-adiabáticas.

La sonda situada en la zona inferior alcanza temperaturas claramente inferiores al resto. Ello podría deberse, aparte de errores en el registro, a que la temperatura se transmite a la cimentación, la cual dispone de mayor superficie, estando más fría.

En los tableros tanto lado Pérgola como lado Palacio, se registraron asimismo las temperaturas de las sondas señaladas en la figura 2 presentadas con anterioridad. Este registro se realizó durante 56 horas con medidas cada hora en dicho período.

En las figuras 4 y 5 puede verse, respectivamente, los resultados correspondientes a los tableros lado Pérgola y lado Palacio. En ambas figuras la escala de tiempos es diferente; en cualquier caso, la máxima temperatura se alcanza transcurrido el mismo número de horas desde el inicio del hormigonado para los dos tableros.

3.3. ESTUDIO NUMÉRICO

Formulación general

Tal como se ha citado anteriormente para llevar a cabo el estudio térmico se ha aplicado un modelo numérico lineal basado en el método de los elementos finitos. Así, asumiendo que el hormigón cumple diferentes hipótesis (continuo, isótropo y homogéneo), la ecuación diferencial que rige el problema de transferencia de calor es:

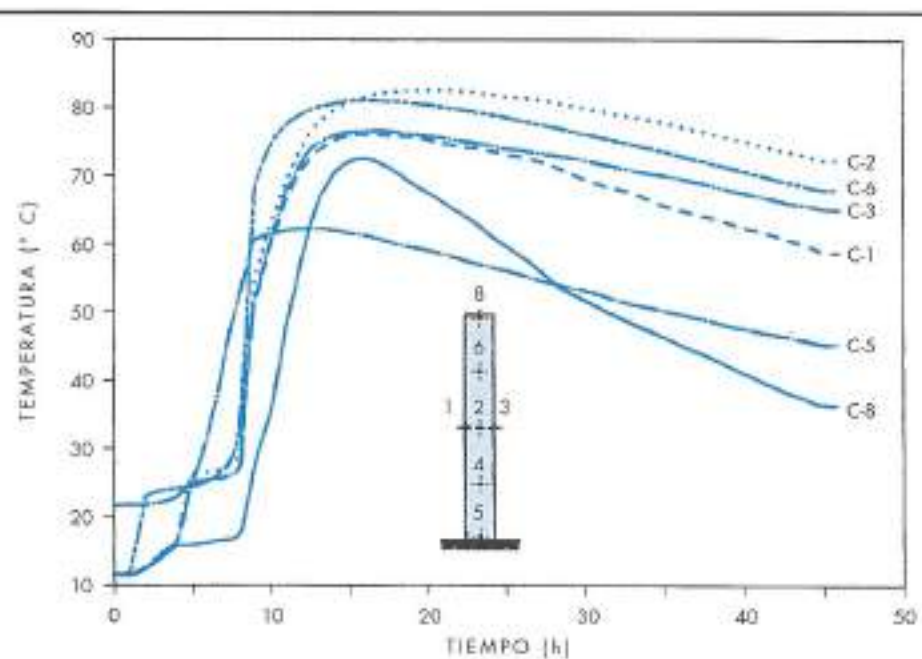


FIGURA 3. Registro de temperaturas en el muro lado Palacio.

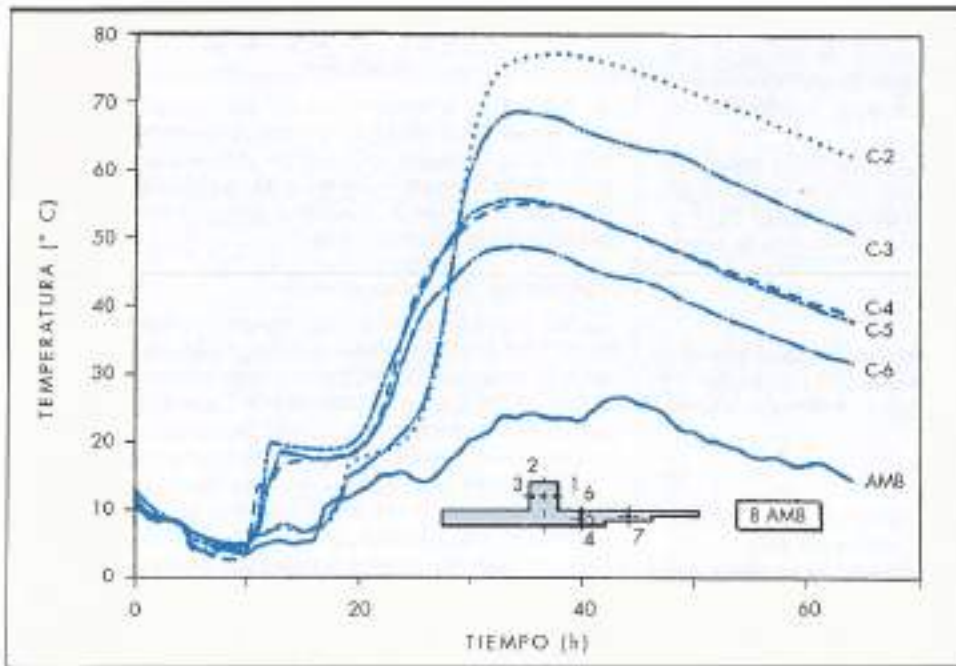


FIGURA 4. Temperaturas tablero lado Pergola.

$$k \cdot \nabla^2 T + q_A = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

donde

- ρ es la densidad del hormigón (kg/m^3)
- c es el calor específico ($\text{J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$)
- k es la conductividad térmica ($\text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}$)
- q_A es el calor generado por unidad de volumen y unidad de tiempo (W/m^3) (calor de hidratación)
- T es la temperatura del hormigón ($^\circ\text{C}$) en cualquier punto y para cualquier instante de tiempo.

En los contornos exteriores de las estructuras de hormigón la distribución de temperaturas se ve fuertemente determinada por la interacción con el entorno, tal como se ha podido observar en las mediciones reales. Así pues, para obtener la distribución de temperaturas deberá realizarse un análisis térmico que contemple tal interacción. En este estudio se considera que las propiedades térmicas del hormigón así como la densidad del mismo no dependen de la temperatura. Esta hipótesis es muy razonable ya que la magnitud de las temperaturas alcanzadas no es elevada.

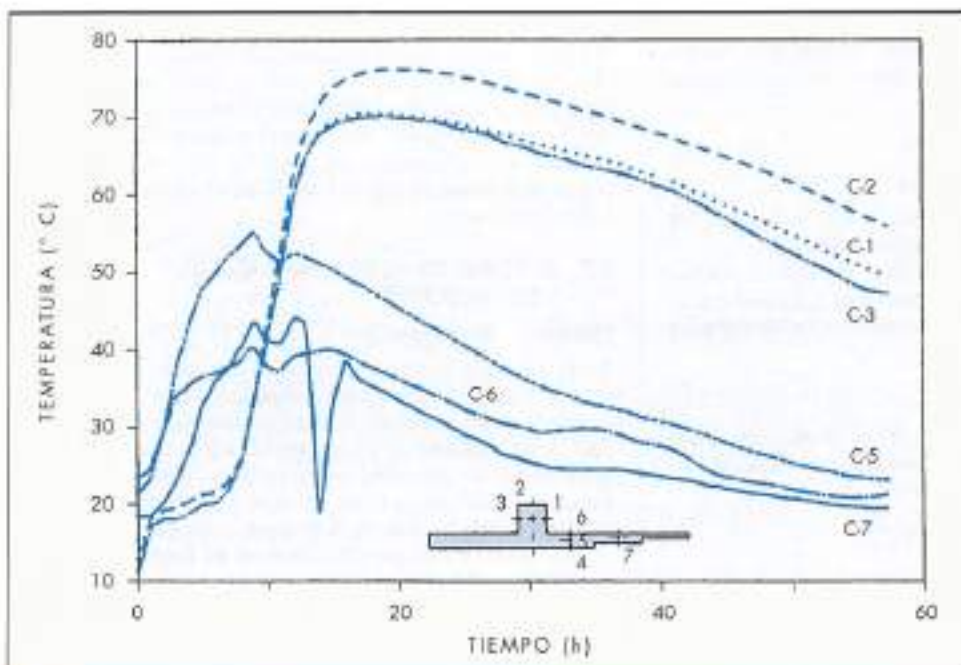


FIGURA 5. Temperaturas tablero lado Palacio.

Incidencia ambiental

El calor q transferido entre la superficie de hormigón y el ambiente es resultante de los correspondientes mecanismos de transferencia de calor por convección q_c , irradiación térmica q_r y radiación solar q_s .

El calor transferido, perdido o ganado, en la superficie por convección q_c , como resultado de la diferencia de temperaturas entre la superficie expuesta del paramento T_{sxp} y la temperatura del aire T_{aire} , viene determinado por la ley de enfriamiento de Newton

$$q_c = h_c(T_{sxp} - T_{aire}) \tag{2}$$

donde h_c es el coeficiente de transferencia de calor por convección (en $W/m^2 \text{ } ^\circ C$), el cual depende de la velocidad de viento y de la textura de la superficie de hormigón. En este estudio se ha tomado

$$h_c = 3,8w + 4,7 \tag{3}$$

donde w es la velocidad del viento (en m/seg). En el estudio realizado, la variación de la temperatura del aire T_{aire} durante el día atiende a una función senoidal de variación diaria a partir del valor medio de la temperatura y de su rango diario.

El calor transferido por irradiación térmica q_r , se obtiene a través de la ley de Stefan-Boltzmann, la cual de forma simplificada puede formularse mediante la expresión siguiente

$$q_r = h_r(T_{sxp} - T_{aire}) \tag{4}$$

en la que h_r es el coeficiente de transferencia por irradiación térmica (en $W/m^2 \text{ } ^\circ C$), que depende de la temperatura existente en la superficie T_{sxp} , de la emisividad del hormigón ($\epsilon = 0,88$) y de la constante de Stefan-Boltzmann. Para este estudio el coeficiente h_r se expresa mediante la ecuación:

$$h_r = \epsilon[4,8 + 0,075(T_{sxp} - 5)] \quad T_{sxp} \text{ en } ^\circ C \tag{5}$$

El calor transferido por radiación solar (q_s) puede expresarse mediante la ecuación

$$q_s = \alpha I \tag{6}$$

en donde α es la absorptividad del hormigón ($\alpha = 0,55$) e I es la radiación solar total incidente sobre la superficie del paramento (en W/m^2) en el instante t . Para su evaluación se ha adoptado la siguiente expresión

$$I(t) = \frac{2W}{T_0} \text{sen}^2\left(\frac{\pi t}{T_0}\right) \tag{7}$$

siendo W la radiación solar total incidente en un día (en Wh/m^2) y T_0 la duración del día solar (en horas).

Un estudio más detallado del modelo de análisis térmico y especialmente de la implementación de las condiciones ambientales en el mismo puede encontrarse en Mirambell y Aguado (1999).

Color de hidratación

El calor de hidratación Q (en J/gr), en un proceso en el que la temperatura varía, puede determinarse mediante la formulación propuesta por Rastrup (1954)

$$Q = A + E \cdot \exp. [-bt_c^n] \tag{8}$$

en donde A , E , b y n son constantes que dependen de la dosificación del hormigón y del tipo y contenido de cemento. La variable t_c es un tiempo equivalente al proceso de duración real t y se obtiene mediante la siguiente expresión numérica.

$$t_c = \frac{1}{3.600} \sum_{t_0}^t 2^{\frac{(T-T_0)}{10}} \Delta t \tag{9}$$

en donde T es la temperatura del proceso durante el intervalo de tiempo Δt (seg) y T_0 la temperatura uniforme de referencia para la cual se obtienen los parámetros de la función Q . La formulación del calor generado por unidad de volumen y unidad de tiempo $q_h = \partial Q/\partial t$ se presenta en Mirambell et al (1993) y Branco et al (1992).

Contratación del modelo numérico

En la contratación del modelo numérico se han utilizado los resultados correspondientes al tablero lado Palacio. En la figura 6 se muestran los datos geométricos de la sección transversal así como la ubicación de los termopares utilizados en la contratación. Asimismo, la citada figura muestra la malla de elementos utilizada en el estudio tridimensional.

Las propiedades térmicas del hormigón así como las condiciones ambientales se presentan en la tabla 1. Estos valores no han sido medidos directamente (excepto la temperatura), si bien son valores acordes con el tipo de hormigón estudiado y con la ubicación de la estructura. La densidad del hormigón se ha considerado igual a $2,5 \text{ t/m}^3$.

Conductividad térmica ($W/m \text{ } ^\circ C$)	2,0
Color específico ($J/Kg \text{ } ^\circ C$)	1.056
Coef. expansión térmica ($^{\circ} C^{-1}$)	11×10^{-6}
Radiación solar (Wh/m^2)	1.900
Temperatura del aire ($^{\circ} C$)	7,0 - 13,0
Velocidad del viento (m/seg)	1,0

TABLA 1. Propiedades térmicas del hormigón y condiciones ambientales.

En la figura 7 se presentan las temperaturas medidas en los puntos A y B, comparándolas con las temperaturas obtenidas según el método numérico utilizado. Las máximas temperaturas se alcanzan después de 20 horas de registro si bien corresponden a 12 horas desde el momento en el que se hormigonó la sección donde estaban ubicados los termopares. Los coeficientes E , b y n de la ecuación [8] resultantes del ajuste se presentan en la citada figura. En general, puede apreciarse una gran bondad en el ajuste de los resultados numéricos.

3.4. DISTRIBUCIONES DE TEMPERATURAS Y DE TENSIONES

Distribución de temperaturas

Partiendo de la función de evolución del calor de hidratación q_h con el tiempo, cuyos parámetros E , b y n se recogen en la figura 7, se ha aplicado un modelo numérico para determinar la distribución de temperaturas en el tiempo, en cualquier punto de la sección transversal del tablero. El método numérico utilizado es el de los elementos finitos. El tiempo total analizado ha sido de 5 días con incrementos de tiempo de una hora, lo cual permite observar de forma satisfactoria la evolución del campo de temperaturas, especialmente, en las primeras horas.

En la figura 8.a se presenta la evolución de las temperaturas en diferentes puntos (A, F, G) de la sección transversal

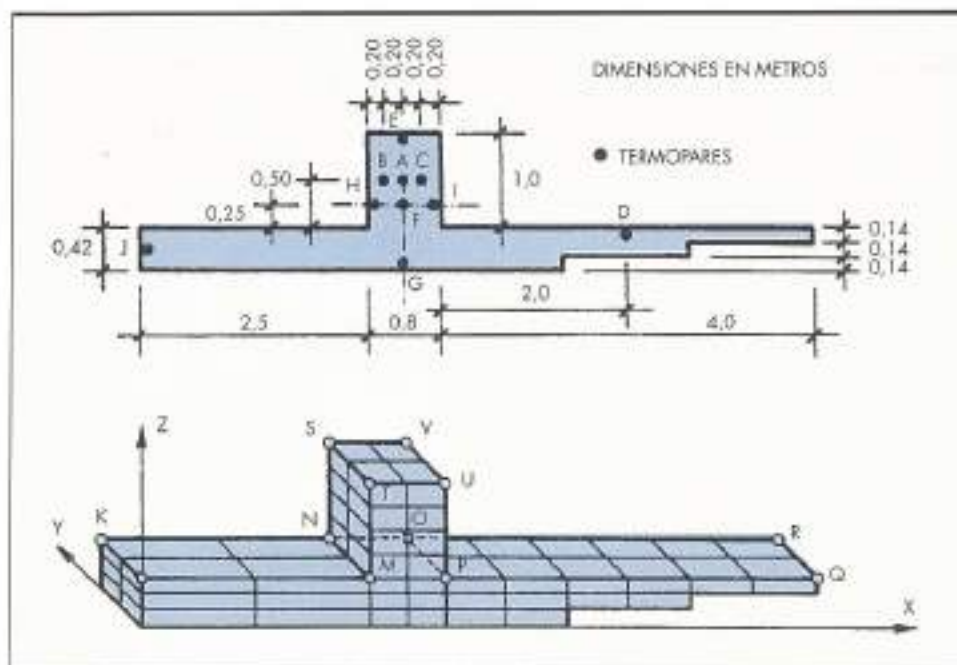


FIGURA 6. Geometría de la sección transversal, disposición de termopares y tipo de malla utilizada.

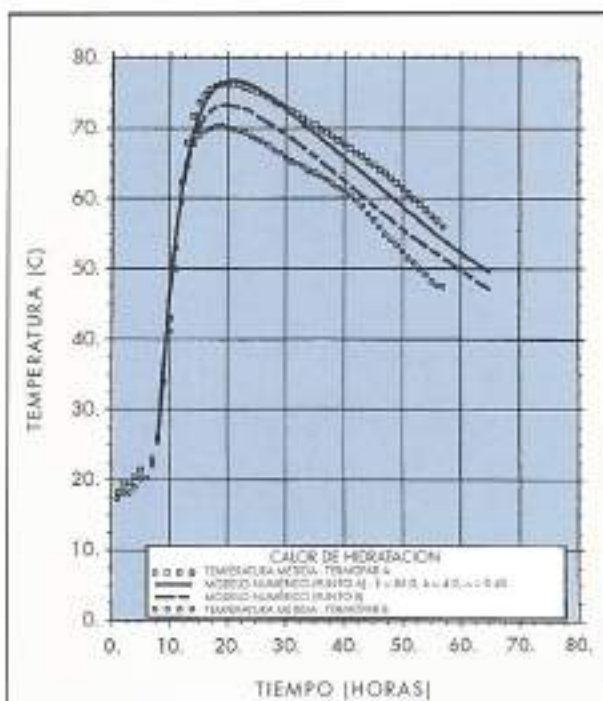


FIGURA 7. Evolución de la temperatura medida y calculada en los puntos A y B.

definida anteriormente. Las máximas temperaturas (alrededor de 78°C) se alcanzan en los puntos A y B, que tal como se observa en la figura 6, están situados en el centro del nervio, mientras que las temperaturas obtenidas para el punto G, situado en el mismo plano vertical, son menores al estar más próximo a la fibra inferior del tablero.

La figura 8.b presenta, asimismo, la evolución de las tem-

peraturas de los puntos D, E y J. En ella puede verse que la temperatura de los puntos D y E situados en la zona de superficie superior (losa, nervio) se ve influida por los efectos de la radiación solar incidente que da lugar a incrementos de temperatura durante las horas de sol. La temperatura del punto J, situado en la superficie lateral de la losa (encofrada en ese período), apenas se ve influida por dicho efecto.

De la evolución de las temperaturas observadas en los diferentes puntos (fig. 8, a y b) puede señalarse que, en este caso, los efectos de la hidratación son prácticamente despreciables a partir del quinto día después de hormigonar. A esa edad, la respuesta térmica de la estructura depende de las condiciones climáticas ambientales.

La figura 9.a muestra las distribuciones de temperaturas no lineales según el eje vertical EFG de la viga durante los instantes de tiempo analizados. Se verifica que las diferencias de temperaturas existentes entre el centro del nervio de la pasarela y su superficie son importantes, especialmente, durante las tres primeras noches, siendo la diferencia máxima encontrada de, aproximadamente, 25°C . En la misma figura puede verse que el efecto de la no linealidad de la distribución de temperaturas disminuye en el quinto día. La figura 9.b muestra las distribuciones de temperaturas a lo largo del eje horizontal HPI.

Distribución de tensiones

El modelo de análisis tenso-deformacional adoptado en este estudio se basa en la resolución del problema de estructuras tridimensionales según la teoría de la elasticidad lineal. El programa numérico desarrollado se basa en la técnica de los elementos finitos. El análisis tensional se lleva a cabo de una forma incremental, introduciendo para cada paso de tiempo los incrementos o decrementos de temperaturas nodales en el mismo. La ley constitutiva adoptada para el hormigón es la elástica lineal y no se consideran los efectos de la retracción y de la fluencia.

Si se ha considerado en el modelo de análisis la variación del módulo de deformación del hormigón en función del ins-

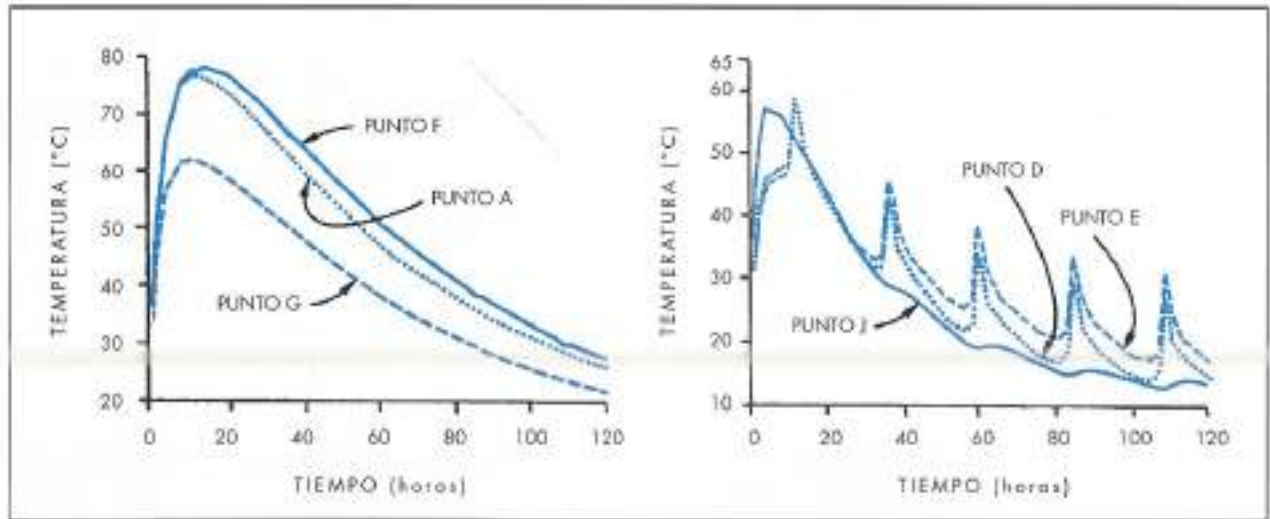


FIGURA 8. Evolución de las temperaturas en distintos puntos.

tante de tiempo que se analiza. La expresión adoptada en el estudio es la propuesta por Carrasquillo et al (1981), aplicable a hormigones de alta resistencia,

$$E_c = 3.320 \sqrt{f'_c} + 6.900 \text{ (en MPa)} \quad (10)$$

en la que f'_c es la resistencia a compresión del hormigón a la edad correspondiente. Para temperaturas superiores a los 20° C, se ha tenido en cuenta en la determinación de E_c la madurez del hormigón.

En la figura 10.a se presentan los resultados obtenidos de la evolución de las máximas tensiones principales σ_1 en las superficies superiores (losa y nervio) de la pasarela. En dicha

figura se observa que los valores de las máximas tensiones principales σ_1 se encuentran próximos a la resistencia a tracción del hormigón obtenida en probetas; ello ocurre así especialmente a lo largo del segundo día tras llevar a cabo la operación de hormigonado, transcurridas 36 horas. Finalizado este período de tiempo, las tensiones principales máximas son claramente inferiores a la resistencia a tracción del hormigón de alta resistencia, desarrollada para cada instante de tiempo analizado. Conviene señalar que en la práctica no se detectaron fisuras de origen térmico en las pasarelas durante los primeros días, tras finalizar la operación de hormigonado.

La figura 10.b muestra la distribución y valores de las tensiones principales existentes en el plano horizontal KLQR

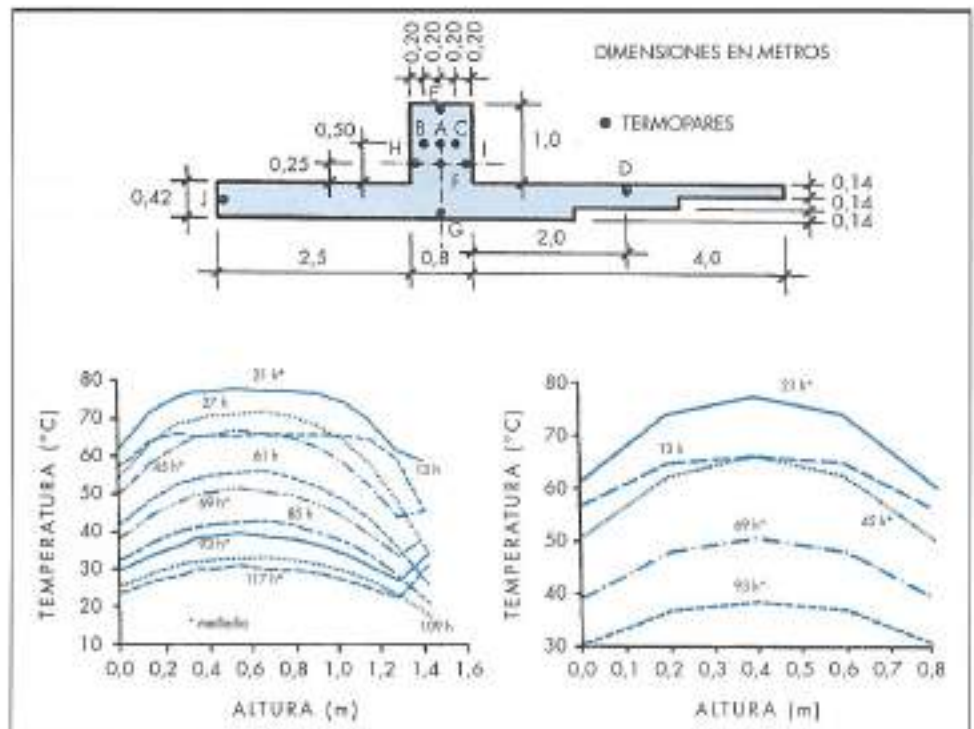


FIGURA 9. Distribuciones de temperaturas según diferentes ejes de la viga nervio de la pasarela para diferentes instantes de tiempo. a) eje vertical EFG, b) eje horizontal HFI.

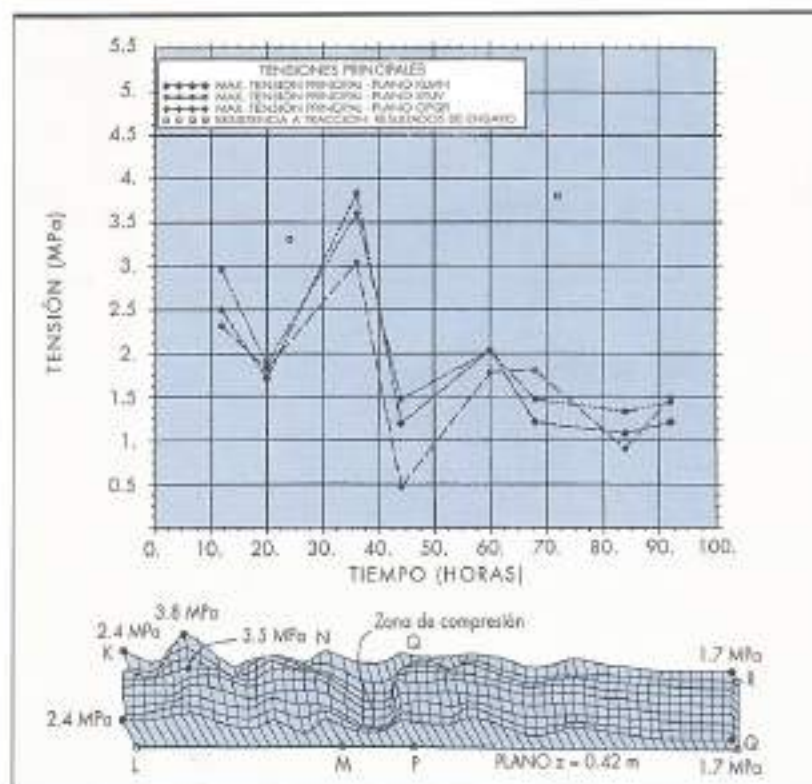


FIGURA 10. Distribución de tensiones.

que contiene el paramento superior de la losa (superficie de piso de la pasarela peatonal) a la edad de 36 horas. Puede apreciarse que los valores de las tensiones principales se encuentran próximos a la resistencia a tracción del hormigón, obtenida en probeta, a dicha edad. Por otra parte, se observa la existencia de un núcleo de compresiones en la zona de dicho plano contenida en el nervio de pasarela. Asimismo, se aprecia también que la magnitud de las tensiones principales σ_x de tracción en las superficies superiores de piso de la pasarela depende de la masa de hormigón existente bajo las mismas (mayores tensiones en la zona de mayor masa).

CONCLUSIONES

Durante el proceso de fraguado del hormigón de alta resistencia se inducen elevados gradientes de temperatura entre el interior y las superficies exteriores de la estructura o elemento analizado; la magnitud de tales gradientes es significativamente superior a la de los gradientes generados en estructuras de hormigón convencional. Las medidas experimentales de temperatura llevadas a cabo en los tableros de las pasarelas de hormigón de alta resistencia analizados han permitido caracterizar térmicamente el hormigón de alta resistencia utilizado. La resolución de un problema inverso mediante la aplicación de un modelo de análisis térmico permite conocer la curva de evolución de temperatura durante el proceso de fraguado del hormigón de alta resistencia, en primeras edades. Mediante la aplicación del modelo térmico y tensional desarrollado se obtienen las distribuciones de temperaturas y de tensiones térmicas asociadas para cada instante de tiempo. Se muestra de forma palpable en los resultados obtenidos la influencia de las condiciones ambientales. Las tensiones de tracción predichas por el modelo en la situación e instante más desfavorables se encuentran próximas a la resistencia a tracción desarrollada por el hormigón en instantes cercanos a las 36 horas transcurridas desde el inicio

del hormigonado. En cualquier caso, no se detectaron fisuras de origen térmico en las pasarelas a lo largo de los primeros días, durante y después de la operación de hormigonado.

REFERENCIAS

- AGUADO, A.; GETTU, R.; OLIVEIRA, M. O. F.; LÓPEZ SAIZ, J. M. (1994). "Caracterización mecánica de un hormigón de alta resistencia". *Revista Hormigón y Acero*, N° 191.
- BELANGER, P. R.; SHIRLAW, M. R. (1993). "Temperature Control in High-Strength Massive Concrete Girders". *Concrete International*. ACI, November.
- BELLOD, J. L.; AGUADO, A.; OLIVEIRA, M. O. F.; FERNÁNDEZ, M. A.; RUI-WAMBA, J. (1994). "Utilización de hormigón de alta resistencia. Pasarelas peatonales de Montjuic". *Revista Hormigón y Acero*, N° 194.
- BRANCO, F.; MENDES, P.; MIRAMBELL, E. (1992). "Heat of Hydration Effects in Concrete Structures". *ACI Materials Journal*, Vol. 89, N° 2, March-April.
- CARRASQUILLO, R. L.; NILSON, A. H.; SLATE, F. O. (1981). "Properties of High-Strength Concrete Subjected to Short-Term Loads". *ACI Materials Journal*, Vol. 78, N° 3, May-June.
- MIRAMBELL, E.; AGUADO, A. (1990). "Temperature and Stress Distributions in Concrete Box Girder Bridges". *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 116, N° 9, September.
- MIRAMBELL, E.; CALMON, J. L.; AGUADO, A. (1993). "Heat of Hydration in High Strength Concrete: Case Study". *Proceedings Third International Symposium on Utilization of High-Strength Concrete*, June 20-24, Lillehammer, Norway. NB, SINTEF, NSF, FIP, CRB and ACI.
- RASTRUP, E. (1954). "Heat of Hydration in Concrete". *Magazine of Concrete Research*, 17, September.
- RUI-WAMBA, J.; AGUADO, A.; OLIVEIRA, M. O. F. (1992). "Proyecto y construcción de unas pasarelas de hormigón de alta resistencia". *Revista Cemento-Hormigón*, N° 709, Agosto.



Dramix[®]
FIBRAS DE ACERO PARA HORMIGÓN

LA DIFERENCIA

Drámix. Fibras de acero para una solidez a toda prueba del hormigón. Producidas en todo el mundo por Bekaert, el especialista por excelencia en alambre de acero.

Una garantía de calidad y servicio. Las fibras de acero Drámix se mezclan fácilmente y de manera homogénea. Refuerzan multidireccionalmente



ofreciendo un anclaje perfecto y el mejor rendimiento.

El hormigón con fibras de acero Drámix es el material por excelencia para soleras, túneles y explotaciones mineras, estructuras de seguridad, carreteras y tableros de puentes, aeropuertos, puertos y productos prefabricados.

@ BEKAERT

Bekaert Ibérica S.A.
Traversera de Gracia 30,3.C.
E-08021 Barcelona
Tel. (3) 414 08 52
Fax (3) 201 78 78

SI, deseo me remitan gratuitamente información sobre las aplicaciones:

Soleras industriales Elementos prefabricados Túneles

NOMBRE _____

EMPRESA _____

DIRECCIÓN _____

TEL. _____

FAX _____