

# Estudio térmico -tensional de grandes volúmenes de hormigón frente a la acción del calor de fraguado

Enrique Mirambell  
Dr. Ingeniero de Caminos  
Francisco Pujol  
Ingeniero de Caminos  
Departamento Ingeniería de la Construcción  
E.T.S.I.C.C. y P. de Barcelona  
Universidad Politécnica de Cataluña

## 1. INTRODUCCION

Es conocido que durante el proceso de fraguado y endurecimiento del hormigón, el calor de hidratación del cemento origina un significativo incremento de la temperatura en el interior de la masa de hormigón. Como resultado de las distribuciones de temperaturas obtenidas durante el fraguado y de las condiciones de vinculación de la estructura o elemento que se analice, se originan, en edades tempranas, tensiones térmicas de tracción que pueden ocasionar fisuración en el hormigón. Por consiguiente, se hace necesario el predecir de una forma más o menos realista el estado tensional al que se ven sometidas determinadas estructuras masivas de hormigón por efecto del calor de fraguado —grandes bloques de hormigón para rompeolas de puertos, presas, grandes cimentaciones masivas,...—. Este es el objetivo principal de algunas de las numerosas referencias bibliográficas que versan sobre esta temática, ya sea desde un punto de vista general, ya sea desde un punto de vista práctico aplicado a una determinada tipología en concreto (Rastrup (12), Machida y Uehara (9), Pitkänen (11), Branco y Mendes (3), Yamazaki et al. (17), Acker (2), Holladay (6), Paulon y Saad (10), Ukrainičik et al. (14), van Damme et al. (16), van Breugel (15), Townsend (13), ACI Committee 207 (1)).

El presente artículo se centra en el estudio térmico y tensional de grandes bloques cúbicos de hormigón, predimensionados para su utilización posterior en rompeolas de puertos. En primer lugar se determinan los parámetros definitorios de la curva de generación interna de calor durante el proceso de fraguado del hormigón, los cuales han sido obtenidos a través del

desarrollo y contrastación de los resultados derivados de estudios experimentales de medición de temperaturas en bloques a escala reducida y de estudios analíticos de obtención de distribución de temperaturas en el interior de tales bloques. Caracterizada ya la acción térmica del calor de fraguado, se pasa a continuación a estudiar el comportamiento térmico y tensional de los bloques cúbicos predimensionados de hormigón, los cuales, en este estudio concreto, presentan unas dimensiones de 3,30 x 4,00 x 3,30 m y un peso aproximado de 110 toneladas.

El modelo numérico de predicción de las distribuciones de temperatura, se basa en un modelo tridimensional de elementos finitos que contempla los mecanismos de transferencia de calor —conducción, convección y radiación de onda corta y onda larga— y el fenómeno de la generación interna de calor durante el proceso de fraguado. Las distribuciones tensionales inducidas por la acción térmica y por el peso propio del bloque, se obtienen mediante la utilización de un modelo de análisis tridimensional de elementos finitos, considerando para el material hormigón una ley elástica-lineal, la cual contempla la variación del módulo de deformación durante los primeros días. Los resultados obtenidos han permitido cuantificar, tanto desde un punto de vista térmico como tensional, el efecto del calor de fraguado sobre el comportamiento de grandes estructuras masivas de bloques de hormigón para rompeolas, en primeras edades.

Cabe aquí señalar que el estudio térmico y tensional presentado en este artículo se plantea para un hormigón determinado, para unos bloques con dimensiones previamente definidas y

para unas condiciones de contorno, tanto ambientales como estructurales y de ejecución, también previamente definidas. Es conocido que el efecto de la acción térmica del calor de fraguado depende de numerosos factores; en lo referente al propio material hormigón, tal efecto depende, entre otros, del tipo y dosificación del cemento, del tipo de áridos, de la relación agua/cemento, de si se utilizan o no aditivos retardadores de fraguado; en lo que se refiere a las condiciones ambientales, los efectos de la generación interna de calor dependerán de la exposición del elemento en estudio a radiación solar, de la temperatura ambiente y de otras variables climáticas como la velocidad del viento, etc.; en lo relativo a condiciones de ejecución, el efecto del calor de fraguado dependerá de la temperatura inicial de la mezcla, del tipo de encofrado, del procedimiento constructivo, de si se lleva a cabo o no un enfriamiento artificial del hormigón, ...; por último, las condiciones de vinculación supuestas en el análisis estructural, influirán en la respuesta tensional de las estructuras masivas de hormigón sometidas a la acción del calor de fraguado.

No obstante, los resultados derivados del presente estudio mostrarán un hecho que cualitativamente tiene lugar en todo tipo de estructura masiva de hormigón sometida al efecto del calor de fraguado, y es la fuerte no linealidad del campo de temperaturas que se induce en el seno de la masa, con temperaturas elevadas en el centro del elemento —bloque— analizado y con temperaturas próximas a la temperatura ambiente en la superficie exterior. Ello se traduce en unas distribuciones tensionales tales que el contorno exterior de la estructura masiva se ve sometida a tracciones que, dependiendo de los factores anteriormente mencionados, pueden superar fácilmente la resistencia a tracción que el hormigón ha podido desarrollar a tales edades tempranas.

## 2. ESTUDIOS EXPERIMENTALES EN BLOQUES DE HORMIGÓN. DETERMINACION DE LA CURVA DE CALOR DE FRAGUADO

### 2.1. Caracterización del hormigón del bloque

En primer lugar es obvio que debe partirse de un hormigón que cumpla los requisitos exigidos en cuanto a trabajabilidad y resistencia característica. En este estudio particular, el cemento utilizado fue un cemento III-2/35 SR MR de bajo calor de hidratación. El fabricante de cemento aportó los calores de hidratación del cemento a diferentes instantes de tiempo, los cuales se recogen en la tabla 1.

La resistencia característica exigida al hormigón del bloque de rompeolas era de 225 Kp/cm<sup>2</sup>,

adoptándose una dosificación de cemento de 300 kg por metro cúbico de hormigón.

**Tabla 1**  
Calor de hidratación del cemento, a diferentes instantes de tiempo

Tiempo (horas)	Calor de hidratación (cal/gr)
12	26,6
24	46,5
72	55,0
120	57,2

Por otra parte, el hecho de que los áridos empleados para la confección del hormigón no fueran de muy buena calidad y el hecho de que la arena presentara un porcentaje de absorción elevado, motivó el que la relación agua/cemento tuviera que aumentarse hasta un valor de 0,58 para conseguir una adecuada trabajabilidad del hormigón. El primer valor adoptado de la relación a/c fue de 0,50, obteniendo un asiento prácticamente nulo en el cono de Abrams. Aunque la trabajabilidad del hormigón no es un requisito de diseño especialmente restrictivo para la tipología en estudio —grandes bloques— es claro que la consistencia del hormigón no podía ser tan seca.

Considerando algunos condicionantes previos, tales como que el tamaño máximo del árido es de 40 mm y que no se emplearían aditivos que mejoraran la trabajabilidad del hormigón o retardaran el proceso de fraguado, se llegó a la dosificación definitiva del hormigón con el que se confeccionarían los bloques del rompeolas:

Arido 20/40	625,7 Kg
Arido 5/20	760,1 Kg
Arena 0/5	678,0 Kg
Cemento	300,0 Kg
Agua	170,0 litros

Con esta dosificación se fabricaron 3 series de 5 probetas cilíndricas, de 15 x 30 cm, para romper a compresión a 7, 14 y 28 días. Los resultados obtenidos para la resistencia media a compresión, se presentan en la tabla 2. Cabe señalar que la dispersión en los resultados de rotura de las 5 probetas, para las 3 series confeccionadas, fue muy pequeña.

**Tabla 2**  
Valores de la resistencia media a compresión, en probeta cilíndrica, a 7, 14 y 28 días

Tiempo (días)	Resist. Comp. (Kp/cm <sup>2</sup> )
7	199,0
14	241,0
28	288,0

## 2.2. Experimento de medición de temperaturas en el bloque de hormigón, en condiciones cuasi-adiabáticas

Caracterizado ya el hormigón desde un punto de vista mecánico y resistente, de cara a poder evaluar con cierto rigor la influencia del calor de fraguado sobre el comportamiento tensional de bloques de hormigón, se hacía necesario caracterizar éste desde un punto de vista térmico. Por consiguiente, debía determinarse la curva de generación interna de calor en el seno de la masa de hormigón durante el proceso de fraguado y endurecimiento. La realización de experimentos de medición de temperaturas en bloques de hormigón, a escala reducida 1:3 con respecto a los bloques predimensionados, perseguía tal objetivo. Posteriormente, la contrastación de los resultados experimentales con los resultados analíticos derivados del análisis térmico tridimensional del bloque experimentado, permitiría identificar los parámetros definitorios de la curva de calor de fraguado para el hormigón en cuestión.

El primer experimento de medición de temperaturas en el bloque de hormigón, se planteó en condiciones cuasi-adiabáticas. Su volumen era de  $1 \text{ m}^3$ , de dimensiones  $1,0 \times 1,0 \times 1,0$  metros, y se aisló térmicamente mediante la utilización de chapas de poliestireno extrusionado de 10 cm de espesor. Dadas las características térmicas de este material, con una muy baja conductividad térmica ( $k = 0,028 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$ ), el hormigón envuelto en él se comporta como el hormigón en el interior de un bloque de grandes dimensiones. Asimismo se dispuso un encofrado de madera, de 3 cm de espesor, arriostrado de forma conveniente, en torno al poliestireno. Previamente a la operación de hormigonado, se ubicaron las sondas de medida de temperatura en los puntos deseados, las cuales se conectaban a un medidor-registrador. Los datos registrados se volcaron posteriormente a un miniordenador. Los dispositivos de medida de temperatura se colocaron en dos ejes de simetría del cubo (según uno de los dos ejes horizontales y según el eje vertical de simetría) tal como se muestra en la figura 1. El registro de temperaturas se realizó de forma continua a lo largo de los 13 primeros días después de finalizar la operación de hormigonado.

Puesto que el bloque se encuentra en condiciones adiabáticas —aislado térmicamente— la temperatura en todos los puntos de medida debía ser muy similar; y así ocurrió. Las diferencias máximas obtenidas entre las temperaturas de cada uno de los dispositivos de medida fueron muy reducidas, no superando en ningún instante, a lo largo de todo el período de registro del experimento, los  $3^\circ\text{C}$ . Ello puede apreciarse claramente en la figura 2, en la cual puede observarse asimismo que la temperatura en el

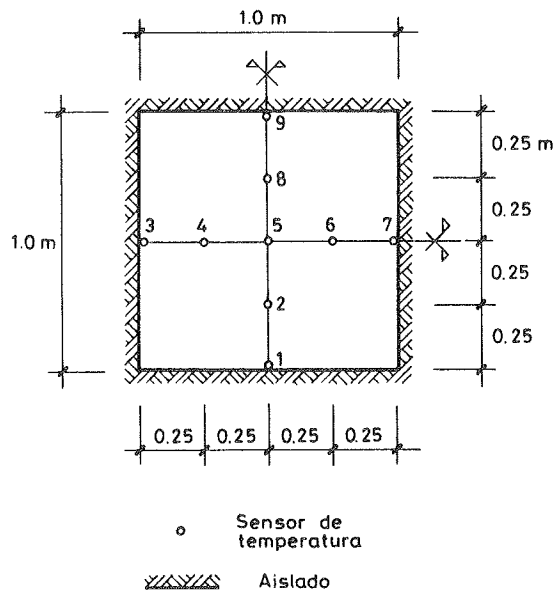


Fig. 1. Ubicación de los puntos de medida de temperatura en el bloque experimental de hormigón, en condiciones cuasi-adiabáticas (alzado).

centro geométrico del cubo es algo superior al resto de puntos instrumentados, tal como era de esperar. También se muestra la evolución de la temperatura ambiente a lo largo del período de duración del experimento.

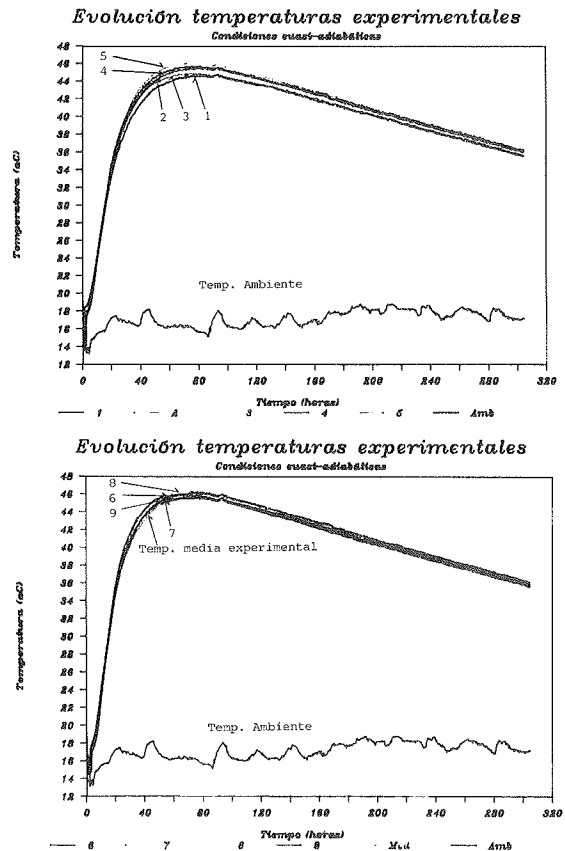


Fig. 2. Evolución de las temperaturas en el hormigón a lo largo del primer experimento.

Por otra parte, en base a los valores suministrados del calor de hidratación del cemento, puede obtenerse el incremento adiabático de temperatura. Así, para un calor de hidratación a 3 días de 55,0 cal/gr, instante para el cual se induce, aproximadamente, la temperatura máxima en el bloque de hormigón, el incremento adiabático sería de 29°C. En efecto, la temperatura máxima registrada en el centro del cubo fue de 46,2°C, aproximadamente igual a la suma de la temperatura inicial de la mezcla, que fue de 17°C, y del incremento de temperatura adiabática. Ello corroboró el suministro de un cemento de bajo calor de hidratación.

### 2.3. Determinación de la curva de calor de fraguado

Conocida la evolución de las temperaturas —mediciones experimentales— en los diferentes puntos instrumentados del bloque, se pasa a continuación a realizar el análisis térmico tridimensional de dicho bloque. La posterior contrastación de resultados experimentales y analíticos, permite determinar la curva de generación interna de calor.

En primer lugar, se exponen sucintamente las bases de cálculo del modelo de análisis térmico utilizado en el presente estudio.

La ecuación diferencial que gobierna el fenómeno de la transmisión del calor es

$$\text{div}(-\kappa \cdot \text{grad } T) - \dot{Q} + \rho c \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

en donde  $\kappa$  es el tensor de conductividades térmicas,  $\rho c$  es la capacidad calorífica del medio y  $\dot{Q}$  es la velocidad de generación interna de calor en el seno de la masa de hormigón.

El modelo de análisis térmico es lineal, es decir, las propiedades térmicas y la densidad, parámetros que influyen en la resolución de la ecuación diferencial de transmisión de calor, no dependen de la temperatura. En este estudio y dado el régimen de temperaturas del hormigón en el que nos movemos, esta hipótesis de partida puede ser perfectamente adoptada. El modelo numérico utiliza la técnica de los elementos

finitos tridimensionales, para evaluar y cuantificar el efecto del calor de fraguado según las tres direcciones del espacio. Asimismo, también se contempla la posible pérdida o ganancia de calor a través del contorno exterior del elemento que se va a analizar, como resultado de los mecanismos de transferencia de calor por convección y por radiación, de onda corta y onda larga.

$$k_x \cdot \left( \frac{\partial T}{\partial x} n_x \right) + k_y \cdot \left( \frac{\partial T}{\partial y} n_y \right) + k_z \cdot \left( \frac{\partial T}{\partial z} n_z \right) + q(x, y, z, t) = 0 \quad (2.a)$$

$$q(x, y, z, t) = q_{\text{radiación solar}} + q_{\text{convección}} + q_{\text{re-radiación}} \quad (2.b)$$

De cara a llevar a cabo el análisis térmico tridimensional del bloque experimental de hormigón, es necesario contemplar la existencia de los tres materiales presentes en el experimento: madera (encofrado), poliestireno extrusionado (aislante térmico) y hormigón (bloque). En la tabla 3 se presentan los valores adoptados para la densidad y las propiedades térmicas de dichos materiales.

Debido a la simetría central del problema, se ha llevado a cabo el análisis térmico de una octava parte del bloque de 1 m<sup>3</sup>. Dicha parte del cubo se ha discretizado mediante 8 elementos cubos isoparamétricos y serendipitos de 20 nodos. El encofrado de madera y las placas de poliestireno, también han sido discretizados mediante elementos cubos de 20 nodos. La figura 3 muestra la malla adoptada en el análisis térmico.

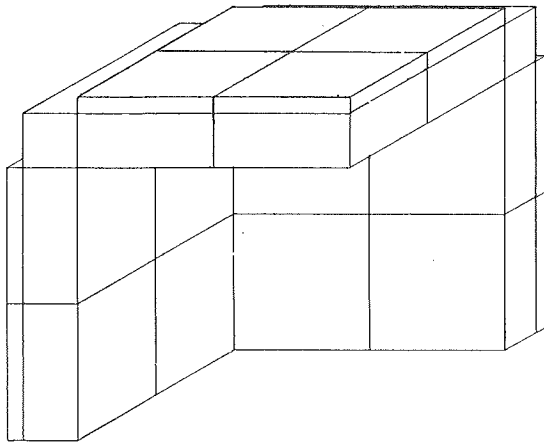
En lo referente a la curva de generación interna de calor durante el proceso de fraguado, puede suponerse que ésta varía en el tiempo de forma exponencial. En el presente estudio se ha utilizado la expresión propuesta por Rastrup (12), la cual ha sido utilizada asiduamente en estudios relativos a la influencia del calor de fraguado sobre el comportamiento tenso-deformacional en estructuras masivas de hormigón. Dicha expresión, para el cemento, presenta la siguiente forma:

$$Q = a + E \cdot e^{-bt \cdot t} \quad (3)$$

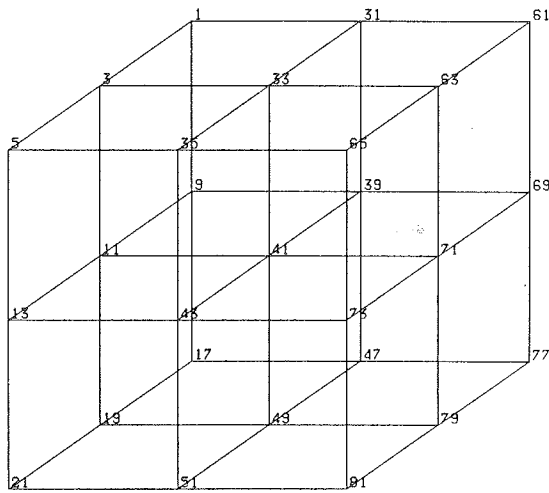
Tabla 3

Valores de la densidad y de las propiedades térmicas de los materiales, adoptados en este estudio

Propiedad	Hormigón	Poliestireno	Madera
Conductividad (W/m °C)	1,5	0,028	0,14
Calor específico (J/Kg °C)	960,0	836,00	1.254,0
Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	2.400,0	35,0	410,0



Encofrado y aislante



Bloque de hormigón

Fig. 3. Mallas de discretización del encofrado, del aislante térmico y del bloque de hormigón.

Realmente, el término que entra en juego en la ecuación diferencial de transmisión de calor [véase ecuación (1)] es la generación de calor por unidad de tiempo y unidad de volumen de hormigón. Así pues, el valor de  $Q$  será:

$$\dot{Q} = E \cdot e^{-bt^n} (nb) t_c^{n-1} \cdot C \quad (4)$$

En esta expresión,  $C$  representa la cantidad de cemento por  $m^3$  de hormigón, que en este estudio es de  $300 \text{ Kg}/m^3$ ;  $E$  es el calor de hidratación desprendido a tiempo infinito; y  $b$  y  $n$  son exponentes que hay que determinar. Por otra parte, el valor de  $t_c$  representa un tiempo equivalente, distinto al real, que tiene en cuenta el hecho de que el proceso de generación de calor tiene lugar a temperatura variable. Basándose en datos experimentales, Rastrup (12) propone la siguiente expresión para el tiempo equivalente:

$$t_c = \int_0^t 2^{(T-T_r)/10} dt \quad (5)$$

Expresada en forma incremental, la expresión (5) se transforma en

$$t_c = \sum_0^t 2^{(T-T_r)/10} \Delta t \quad (6)$$

en donde  $T$  es la temperatura del proceso durante el intervalo de tiempo  $\Delta t$ , y  $T_r$  es la temperatura uniforme de referencia para la cual se determinan los parámetros de la ecuación (4). En el presente estudio, la contrastación de los resultados derivados del modelo de análisis, con los derivados de la experimentación, ha permitido determinar, para una temperatura de referencia  $T_r = 0^\circ\text{C}$ , los valores de dichos parámetros, los cuales se presentan en la tabla 4.

Tabla 4

Valores de los parámetros que determinan la velocidad de generación interna de calor por unidad de volumen ( $T_r = 0^\circ\text{C}$ )

E (cal/gr)	b (horas <sup>2</sup> )	n
80,0	7,0	0,45

En la figura 4 se representa la evolución de la media de los valores experimentales registrados en los nueve puntos de medida de temperatura, a lo largo del ensayo, y la evolución del valor de la temperatura en el nodo central del cubo, obtenida mediante la aplicación del modelo de análisis térmico.

Determinación curva calor de fraguado

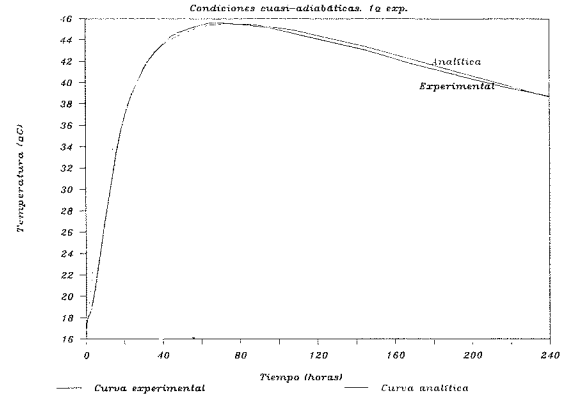


Fig. 4. Determinación de la curva de calor de fraguado. Identificación de los parámetros  $E = 80 \text{ cal}/\text{gr}$ ,  $b = 7 \text{ horas}^2$ ,  $n = 0,45$  (en condiciones cuasi-adiabáticas).

Como puede apreciarse, la diferencia entre ambas evoluciones de las temperaturas contrastadas es mínima. Por consiguiente, puede concluirse que los parámetros  $E$ ,  $b$  y  $n$  presentados en la tabla 4, definen el comportamiento térmico de este hormigón frente a la acción del calor de fraguado. La curva de generación interna de calor por unidad de volumen y unidad de tiempo, obtenida a través de la sustitución de los

valores de dichos parámetros, será la que se introducirá como acción que hay que considerar en el análisis térmico tridimensional del bloque predimensionado para su utilización en el rompeolas.

#### 2.4. Experimento de medición de temperaturas en el bloque de hormigón, en condiciones no adiabáticas

El objetivo principal de este segundo experimento era, por una parte, contrastar la bondad de los resultados experimentales obtenidos en el primer experimento, así como verificar los valores de los parámetros de definición de la curva de generación interna de calor, obtenidos a través del experimento. Por otra parte, también serviría para contrastar de nuevo el modelo de análisis utilizado en el estudio.

En este segundo experimento se dispuso material aislante —poliestireno extrusionado— en todas las caras exteriores excepto en dos, permitiendo así flujo de calor hacia el exterior, según una de las dos direcciones horizontales, desde el principio del experimento. El bloque de hormigón tenía un volumen de  $1,20 \text{ m}^3$  con dimensiones  $1,20 \times 1,0 \times 1,0 \text{ m}$ . Los valores adoptados para las propiedades térmicas de los materiales, no varían con respecto a los adoptados en el primer experimento (véase tabla 3). Por otra parte, las condiciones de ejecución de este experimento fueron idénticas a las del primero, ubicándose los nueve puntos de medida de temperatura en el interior del bloque, en el plano horizontal de simetría. La ubicación de dichos puntos de medida se muestra en la figura 5. El registro de temperaturas se realizó de forma continua a lo largo de los 13 primeros días después de finalizar la operación de hormigonado.

La figura 6 muestra la evolución de las temperaturas en los puntos de medida ubicados según el eje horizontal de simetría del bloque que no se encuentra aislado. De dicha gráfica pueden desprenderse algunas conclusiones parciales que corroboran la bondad del ensayo experimental. En primer lugar, los puntos de medida 7 y 8 deben encontrarse a menor temperatura que los demás, puesto que aquéllos se encuentran ubicados en el contorno del bloque y en contacto, prácticamente, con el encofrado de madera. En las caras no aisladas térmicamente, el flujo de calor hacia el exterior es mayor y ello se traduce en una disminución de la temperatura en dichos puntos de medida.

Por otra parte, la evolución de la temperatura en los restantes puntos de medida debe ser muy similar, puesto que todos ellos se encuentran en unas condiciones cercanas a las cuasi-adiabáticas. No obstante, debido a que no existe

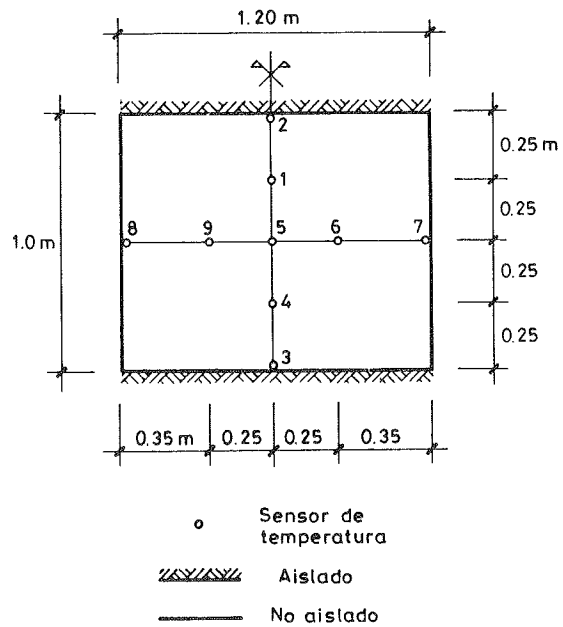


Fig. 5. Ubicación de los puntos de medida de temperatura en el bloque experimental de hormigón, en condiciones no adiabáticas (planta).

aislamiento térmico según una de las dos direcciones horizontales, la temperatura máxima alcanzada en estos puntos de medida debe ser inferior a la obtenida en el primer experimento, bajo condiciones cuasi-adiabáticas. Concretamente, para el nodo central del cubo, en el primer experimento se alcanzó una temperatura máxima de  $46,2^\circ\text{C}$ , mientras que para el segundo experimento dicho nodo alcanzó una temperatura máxima de  $43^\circ\text{C}$ .

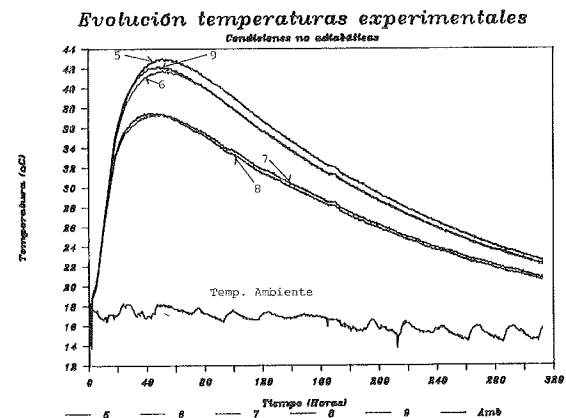


Fig. 6. Evolución de las temperaturas en los puntos de medida del eje horizontal no aislado, en el experimento en condiciones no adiabáticas.

Al igual que en el primer experimento, se procedió a continuación a la contrastación de los resultados experimentales con los derivados del modelo de análisis. Las bases de cálculo son las ya expuestas con anterioridad; la única diferen-

cia estriba en que los elementos finitos que modelaban el aislante térmico en el primer experimento, en uno de los dos ejes horizontales, se transforman en elementos de hormigón. Por otra parte, la curva de calor de fraguado viene definida por los parámetros E, b y n obtenidos en el primer experimento (véase tabla 4). En la figura 7 se presenta la evolución de las temperaturas analítica y experimental, en el nodo central y en el nodo exterior situado en una de las dos caras sin aislante térmico.

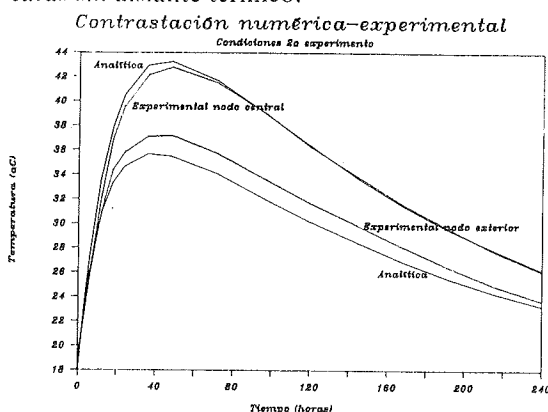


Fig. 7. Evolución de las temperaturas experimental y analítica de los nodos central y exterior en cara sin aislante, en el experimento bajo condiciones no adiabáticas.

En dicha figura puede apreciarse que la temperatura del nodo central obtenida mediante el modelo de análisis es muy similar a la obtenida experimentalmente. Para el nodo exterior, las diferencias entre la temperatura analítica y la obtenida experimentalmente son algo más acusadas; no obstante, la diferencia máxima no supera el valor de 2°C. Ello puede ser debido a que, durante la operación de hormigonado, el encofrado de madera cedió algo en las caras donde precisamente no existía aislante térmico; por consiguiente, el dispositivo de medida de temperatura ubicado en el paramento exterior del bloque, quedó ligeramente introducido, en la masa de hormigón, una distancia suficiente como para que la temperatura registrada experimentalmente fuera algo superior a la obtenida mediante el modelo de análisis.

En cualquier caso, las diferencias no son significativas y, en base a los resultados obtenidos, queda contrastada la bondad del modelo de análisis así como el ajuste de parámetros de la curva de generación interna de calor del hormigón.

### 3. ANALISIS TERMICO DE BLOQUES DE HORMIGON DE GRANDES DIMENSIONES, DURANTE EL PROCESO DE FRAGUADO

#### 3.1. Bases de cálculo.

##### Condiciones adoptadas de ejecución

Habiendo determinado la curva de generación

interna de calor, se lleva a cabo el análisis térmico tridimensional del bloque predimensionado, de 3,30 x 4,0 x 3,30 m, para su utilización en rompeolas. Los resultados de dicho análisis serán las temperaturas de todos los nodos en los que se discretice el gran bloque, para cualquier instante de tiempo, a lo largo de todo el período de análisis.

Las bases de cálculo son las mismas que las expuestas en el apartado 2.3 de este artículo y se fundamentan en la resolución de la ecuación diferencial de transmisión de calor en un medio continuo, imponiendo las pertinentes condiciones de contorno.

Se ha supuesto que el encofrado del bloque es de chapa de acero, de 8 mm de espesor, utilizado frecuentemente en la confección de grandes bloques de hormigón para rompeolas de puertos. El modelo contempla la presencia de dos materiales de medio continuo: acero (encofrado) y hormigón (bloque). Los valores de las propiedades térmicas y de la densidad de ambos materiales se presentan en la tabla 5.

Tabla 5

#### Valores adoptados de la densidad y de las propiedades térmicas de los materiales

Propiedad	Hormigón	Acero
Conductividad (W/m°C)	1,5	46,0
Calor específico (J/Kg°C)	960,0	494,0
Densidad (Kg/m³)	2.400,0	7.850,0

Dado que las condiciones de contorno del análisis térmico y del análisis tensional son, como se verá con posterioridad, diferentes en la cara superior e inferior del bloque, y que el peso propio influye sobre el estado tensional de éste, no se puede analizar únicamente una octava parte del mismo. Así, dada la simetría del problema y el carácter también simétrico de las acciones, se analizará una cuarta parte del bloque real.

El número de nodos de discretización de la estructura es, incluyendo encofrado, 357, que corresponden a un total de 50 elementos de medio continuo, de los cuales 24 son de material hormigón y 26 de material acero. Los elementos utilizados en el análisis son elementos cúbicos serendípicos, de 20 nodos, utilizando 27 puntos de Gauss para su integración. La figura 8 muestra la malla de discretización utilizada para el bloque de hormigón.

Por otra parte, hay que tener presente que la ecuación diferencial que gobierna el fenómeno de la transmisión de calor en el bloque es de régimen transitorio. Debido a ello, y a la propia acción del calor de fraguado, la integración debe realizarse paso a paso en el tiempo, obteniendo para cada incremento de tiempo analizado, los

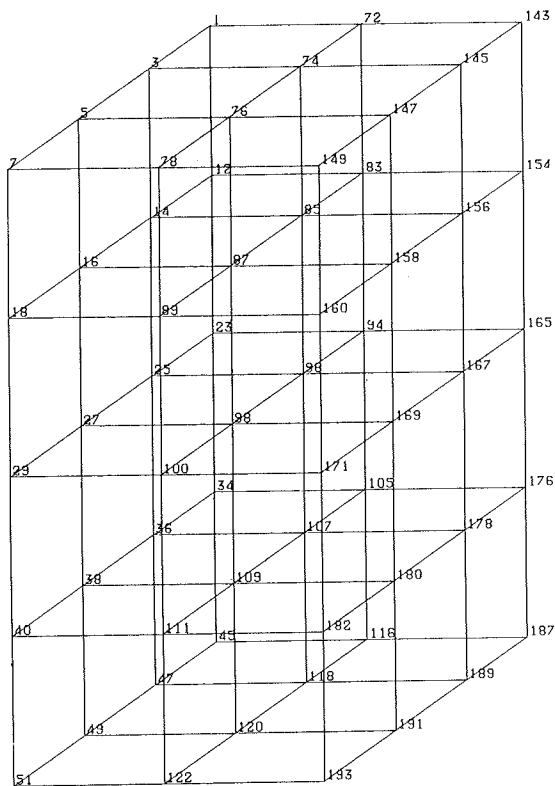


Fig. 8. Malla de discretización del bloque de hormigón de grandes dimensiones.

incrementos de temperatura existentes en cada uno de los nodos de la estructura analizada. La acumulación de dichos incrementos de temperatura permitirá obtener la temperatura en cualquier nodo y para cualquier instante que se considere a lo largo del período de tiempo analizado.

En este estudio, el incremento de tiempo adoptado es de 2 horas y el período total de tiempo analizado es de 10 días. Dado que el esquema de integración adoptado en el tiempo es incondicionalmente estable y convergente, el incremento de tiempo adoptado en el análisis podría haber sido algo mayor. No obstante, debido a que los efectos de la acción térmica del calor de fraguado son claramente significativos en primeras edades, hasta los 5 primeros días, se ha optado por elegir tal incremento de tiempo en el análisis, lo cual permite un seguimiento exhaustivo de la evolución de las temperaturas. Ello, en cualquier caso, es necesario para cuantificar, de forma rigurosa, los estados tensionales asociados a la reacción exotérmica durante el proceso de fraguado y endurecimiento del hormigón.

En lo referente al período de tiempo total contemplado en el análisis térmico, puede comentarse que, a los 10 días, el efecto del calor de fraguado sobre la distribución de temperaturas y de tensiones asociadas no es muy significativo, tal como se apreciará al analizar los resultados obtenidos, empezando a evidenciarse un com-

portamiento cuasi-estacionario en lo que se refiere a la influencia del calor de fraguado.

En cuanto a las condiciones de contorno impuestas en el análisis, éstas deben reproducir, de la forma más fidedigna posible, las condiciones reales de ejecución de los bloques. Así, la cara superior del bloque, por una parte, puede verse sometida a radiación solar directa y, por otra, gana o pierde calor como resultado de los mecanismos de transferencia por convección y por radiación de onda larga. En el resto de las caras, el flujo de calor impuesto es únicamente debido a convección y radiación de onda larga, adoptándose un coeficiente de transferencia de calor menor en la cara inferior, debido a que las pérdidas de calor por convección siempre son menores (menor velocidad de viento).

Como estudio térmico de referencia adoptaremos aquel estudio que nos sitúe en las condiciones más desfavorables, desde un punto de vista térmico y tensional. Aunque *a priori* no es fácil vislumbrar cuáles son esas condiciones, sí puede intuirse que aquéllas tendrán lugar bajo unas condiciones climáticas correspondientes a los meses de verano (Junio, Julio), en el lugar donde se confeccionan los bloques de hormigón. Dicho lugar se ha supuesto próximo a la costa del País Vasco, en las cercanías de la ciudad de Bilbao. En base a la documentación suministrada en las publicaciones del Instituto Nacional de Meteorología ((7), (8)), se han determinado algunos datos climáticos necesarios para llevar a cabo el análisis térmico del bloque, los cuales se recogen en la tabla 6.

Tabla 6

Valores de parámetros térmicos y climáticos adoptados en el análisis térmico del bloque de grandes dimensiones

Parámetro	Valor adoptado
Radiación solar global diaria (Wh/m <sup>2</sup> )	5.600,0
Temp. ambiente media (°C)	19,5
Rango diario temp. ambiente (°C)	10,0
Coef. transferencia cara inferior (W/m <sup>2</sup> °C)	10,0
Coef. transferencia resto caras (W/m <sup>2</sup> °C)	25,0
Temp. inicial de la mezcla (°C)	20,0

### 3.2. Resultados del análisis térmico

A continuación se presentan los resultados de distribución de temperaturas, derivados del análisis térmico tridimensional del bloque en condiciones de verano. La figura 9 muestra la evolución de las temperaturas en el nodo central del



bloque (nodo 171) y en los nodos correspondientes a los centros geométricos de una de las caras laterales (nodo 29) y de la cara inferior del bloque (nodo 193) (véase figura 8).

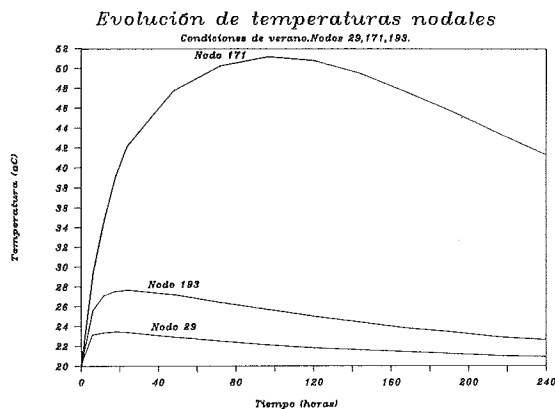


Fig. 9. Evolución de las temperaturas nodales en diferentes nodos del bloque analizado (temperatura inicial de la mezcla = 20°C).

En dicha figura puede apreciarse que el nodo central alcanza una temperatura máxima de 51,2°C, a los 4 días. Por otra parte, de la observación de la evolución de las temperaturas en los nodos situados en las caras exteriores del bloque (nodos 29 y 193), se desprende que el efecto del calor de fraguado en dichos nodos, los cuales lindan con el encofrado de acero, no es significativo. Ello es debido a la alta conductividad térmica del acero, lo cual permite el flujo de calor hacia el exterior de forma sumamente rápida. Asimismo, también puede observarse el hecho de que, debido a un menor valor del coeficiente de transferencia de calor por convección y por radiación en la cara inferior del bloque, las temperaturas alcanzadas en el nodo central de dicha cara (nodo 193) son algo superiores a las alcanzadas en el nodo de la cara lateral (nodo 29).

En cualquier caso, y comparando entre sí las gráficas presentadas en la figura 9, cabe reseñar el hecho de que existen diferencias de temperatura entre el interior del bloque y el contorno exterior, muy significativas, próximas a los 30°C, para diferentes instantes de tiempo, y que dicho salto térmico tiene lugar, *a priori*, en una distancia de como máximo 2,0 metros (el semieje de la dimensión mayor del bloque analizado). Ya se verá, con posterioridad, que debido a la fuerte no linealidad de la distribución de temperaturas, la caída de temperatura tiene lugar en una franja de espesor reducido y situada en el contorno del bloque.

La figura 10 tiene por objetivo mostrar la influencia de la radiación solar directa sobre la cara superior del bloque de hormigón. En dicha figura queda reflejada la evolución de la temperatura en el nodo central de la cara superior

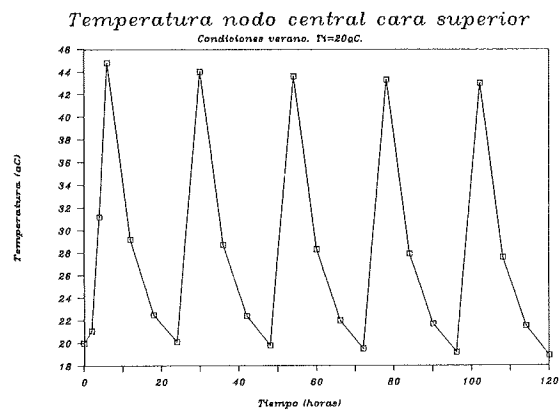


Fig. 10. Evolución de la temperatura en el nodo central de la cara superior del bloque (temperatura inicial de la mezcla = 20°C).

(nodo 149) (véase figura 8). En ella se observa un comportamiento cíclico diario que se corresponde con la incidencia de radiación solar durante el período de insolación. Puede apreciarse que la influencia de la acción térmica del calor de fraguado es muy poco significativa, puesto que para las 14:00 horas solares del primer día de análisis, la temperatura es de 44,7°C, y al cabo de nueve días, dicha temperatura es de 42,0°C. Por último, la fluctuación diaria de temperatura en dicho nodo, próxima a los 24°C, es fruto exclusivamente de la radiación solar.

Las figuras que se presentan a continuación, muestran las distribuciones de temperaturas, según los tres ejes de simetría del bloque, para una temperatura inicial de la mezcla de 20°C. Dichas distribuciones tienen lugar a las 96 horas (4 días) y muestran con gran claridad la fuerte no linealidad del campo de temperaturas inducido en la masa del hormigón. Este instante de tiempo es tal que la temperatura en el nodo central del bloque es la máxima alcanzada a lo largo de todo el período de tiempo analizado y, como se verá con posterioridad, también coincide con el tiempo para el cual se induce la mayor tensión principal de tracción en el bloque. La figura 11 muestra la distribución de temperaturas según el eje vertical (en abscisas se representa la cota de cada uno de los nodos de dicho eje vertical).

Lógicamente, dicha distribución no puede ser simétrica puesto que las condiciones de contorno de las caras superior e inferior del bloque son diferentes. Como se ha expuesto con anterioridad, en función de la existencia de radiación solar incidente, la temperatura del nodo 149 (véase figura 8), situado a la cota 3,30 m, fluctuará aproximadamente entre los 19°C (a las 8:00 horas solares) y los 43°C. Asimismo, puede apreciarse que la parte central del bloque se encuentra a una temperatura más o menos similar, y que la caída brusca de temperatura hacia el contorno exterior tiene lugar en una franja de espesor reducido, tal como se había anunciado anteriormente. Por otra parte, obser-

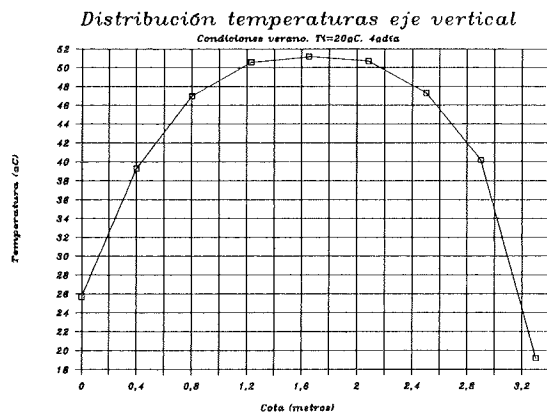


Fig. 11. Distribución de temperaturas según el eje vertical de simetría del bloque, a las 96 horas.

vando la figura, cabe remarcar la gran diferencia de temperaturas existente entre el nodo central de la cara superior (nodo 149 a cota 3,30 m) y el nodo central del bloque (nodo 171 a cota 1,65 m), próxima a los 32°C.

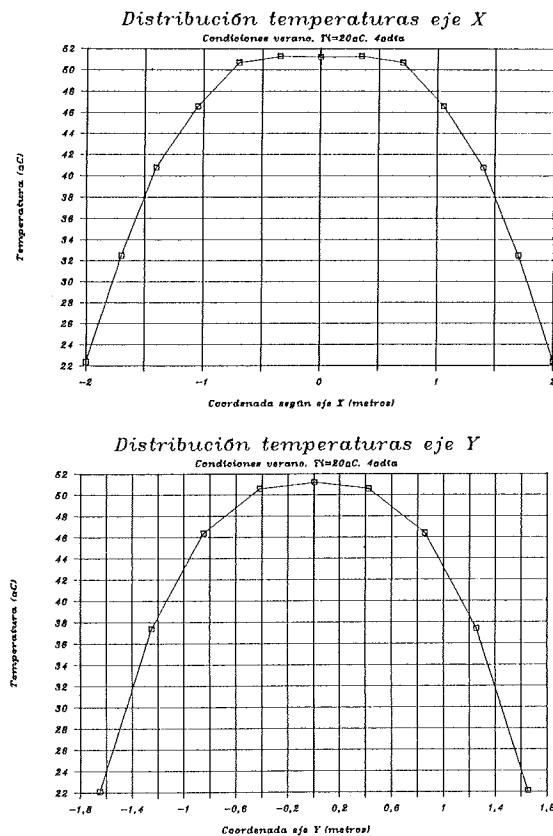


Fig. 12. Distribuciones de temperaturas según los ejes horizontales de simetría del bloque, a las 96 horas.

A continuación, la figura 12 muestra las distribuciones de temperaturas según los ejes horizontales de simetría del bloque analizado. En estos ejes las distribuciones de temperaturas

deben ser simétricas, dado que no existe variación de las condiciones de contorno en las caras exteriores laterales. De la observación de dichas gráficas se extrae la conclusión de que existen diferencias muy significativas de temperatura entre el nodo central del bloque y los nodos centrales de las caras exteriores laterales. En concreto, tanto para la dirección x (la dirección de mayor dimensión del bloque) como para la dirección horizontal y, la diferencia de temperaturas alcanza un valor próximo a los 29°C.

En resumen, y a la vista de los resultados obtenidos a través del modelo de análisis, puede observarse que existen diferencias de temperatura muy significativas entre el interior del bloque y el contorno exterior. Dichas diferencias son máximas en los 4 primeros días y es para esos instantes de tiempo cuando se generarán, *a priori*, las máximas tensiones. A medida que transcurre el tiempo, tales diferencias van amortiguándose y, lógicamente, las tensiones inducidas serán de menor magnitud.

#### 4. ANALISIS TENSIONAL DE BLOQUES DE HORMIGON DE GRANDES DIMENSIONES, DURANTE EL PROCESO DE FRAGUADO

##### 4.1. Bases de cálculo.

##### Variación del módulo de deformabilidad

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. Los elementos según los cuales se discretiza la estructura bloque, son elementos cubos tridimensionales, isoparamétricos y serindípticos, de 20 nodos y, lógicamente, la malla de discretización coincide con la malla adoptada en el análisis térmico. El análisis tensional se lleva a cabo de una forma incremental, introduciendo para cada escalón de carga, asimilable a cada paso de tiempo, los incrementos de temperaturas nodales que tienen lugar en dicho paso de tiempo. La ley constitutiva adoptada para el hormigón es la elástica lineal y no se consideran, en un principio, los efectos de la retracción y fluencia.

Cabe comentar aquí que el análisis tensional se centra fundamentalmente en el análisis del bloque macizo, bajo unas condiciones ambientales correspondientes a la época de verano y con una temperatura inicial de la mezcla de 20°C.

Sí se ha considerado, en el modelo de análisis, la variación del módulo de deformabilidad del hormigón en función del instante de tiempo que se analiza. Efectivamente, el ajustar de forma algo más realista el módulo de deformación,

permitirá obtener una respuesta tensional más cercana a la realidad. Conviene señalar que las expresiones propuestas por la mayoría de los autores y normativas vigentes, de cara a obtener el valor del módulo de deformación del hormigón, hacen referencia a hormigones con 28 días de edad. En el presente estudio nuestro hormigón es más joven, interesando definir dicho módulo para una edad inferior a los 10 días, que es cuando la comparación entre las tensiones térmicas obtenidas y el índice tensional de verificación, en este caso la resistencia a tracción del hormigón, es más crítica. En base a los estudios realizados por Fernández (5) se ha utilizado la siguiente correlación entre  $f_c$  y  $E_c$ :

$$E_c = 3500 \sqrt[4]{f_c^3} \quad (7)$$

Dicha expresión representa un buen ajuste a la experimentación que se realizó [Fernández (5)], y proporciona una relación entre el módulo de deformación y la resistencia a compresión de hormigones jóvenes, de edades iguales o inferiores a los 28 días.

Asimismo, también se ha considerado la madurez a la hora de determinar dicha relación entre la resistencia del hormigón y el módulo de deformación. En este estudio se ha considerado una madurez relativa a 20°C

$$\sum_{j=0}^{n \text{ días}} \left( \frac{T(x, t) + 10}{30} \right) \cdot j \text{ días} \quad (8)$$

Dicha madurez se introduce en una expresión de tipo exponencial que permite obtener la evolución en el tiempo de la resistencia a compresión del hormigón. Dicha curva exponencial ha sido obtenida en función de los resultados de los valores medios de la resistencia a compresión de los ensayos de roturas de probetas a 7, 14 y 28 días, respectivamente, suponiendo que a tiempo infinito la resistencia media del hormigón a compresión es un 25% superior, aproximadamente, a la correspondiente a 28 días.

Así pues, se llega a la siguiente ecuación exponencial:

$$f_c = f_{c_{t \rightarrow \infty}} (1 - e^{-at^b}) \quad (9.a)$$

$$f_c = 355 \cdot (1 - e^{-0.307 t^{0.505}}) \text{ (Kp/cm}^2\text{)} \quad (9.b)$$

El tiempo  $t$  que hay que introducir en esta expresión es la madurez, puesto que el proceso de fraguado y endurecimiento del hormigón del bloque tiene lugar a temperaturas superiores a la de 20°C, temperatura aproximada de referencia para la cual han sido obtenidos los resultados de evolución de la resistencia a compresión de las probetas.

Lógicamente, para determinar la madurez se ha trabajado con una temperatura media aproxi-

mada del bloque en su conjunto. Dicha temperatura media ha sido obtenida como media de las integrales de temperatura extendidas a lo largo de los tres ejes de simetría del bloque analizado.

$$T_{\text{media bloque}} = \frac{1}{3} \left[ \frac{\int_0^{d_x} T(x) dx}{d_x} + \frac{\int_0^{d_y} T(y) dy}{d_y} + \frac{\int_0^{d_z} T(z) dz}{d_z} \right] \quad (10)$$

Si la consideración del efecto de madurez no hubiera sido introducida a través de una temperatura media del bloque, habría sido necesario definir una madurez para cada elemento cúbico de la malla y considerar cada uno de dichos elementos como un material con diferente módulo de elasticidad. No obstante, la precisión o el ajuste alcanzados no justifica la adopción de esta consideración.

La determinación de una temperatura media de bloque y de la madurez del hormigón asociada a tal temperatura, ya permite visualizar y cuantificar el efecto de la temperatura de fraguado sobre la evolución de la resistencia a compresión del hormigón y de su módulo de deformación  $E_c = 3500 f_c^{0.75}$ . Así pues, al final de cada paso de tiempo analizado, se determinará el módulo de deformabilidad del hormigón.

En la figura 13 se presenta la evolución del módulo de deformación del hormigón del bloque, para una temperatura inicial de la mezcla de 20°C y bajo las condiciones de contorno ambientales correspondientes al estudio térmico del bloque en el período de verano, las cuales se han recogido en la tabla 6 del presente artículo.

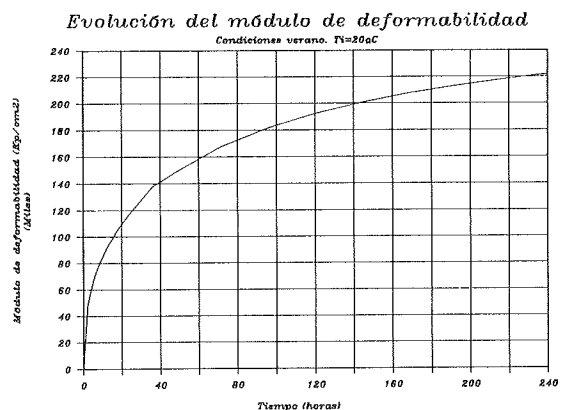


Fig. 13. Evolución del módulo de deformación del hormigón del bloque, en condiciones de verano y para una temperatura inicial de la mezcla de 20°C.

Así, para cada incremento de tiempo, y en función del instante considerado, se adopta el valor del módulo de deformabilidad del hormigón correspondiente al instante para el cual se

lleve a cabo el análisis tensional (el incremento de tiempo adoptado en el análisis es de 2 horas, y el período total analizado es de 10 días).

Por último, ya volviendo a la propia estructura que nos ocupa, cabe comentar que las condiciones de contorno impuestas en el análisis estructural son tales que se impide el corrimiento vertical de todos los nodos situados en la cara inferior del bloque. Al analizar una cuarta parte del bloque por simetría, los nodos de la base pertenecientes a los planos verticales de simetría verán impedido su movimiento en la dirección perpendicular a dichos planos. Asimismo, el valor adoptado para el coeficiente de dilatación térmica del hormigón ha sido  $\alpha = 10 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ , tal como indica la normativa vigente. Cabe señalar que dicho valor podría variar en función del tipo de árido utilizado en la confección del hormigón.

#### 4.2. Resultados del análisis tensional

A continuación se presentan los resultados de distribuciones de tensiones, derivados del análisis tensional tridimensional del bloque, de dimensiones 3,30 x 4,0 x 3,30 m, bajo las condiciones de verano existentes en zona próxima a Bilbao (véase tabla 6). En la figura 14 se presentan las distribuciones de tensiones  $\sigma_x$  a lo largo del eje vertical de puntos de Gauss más próximo al eje vertical de simetría del bloque.

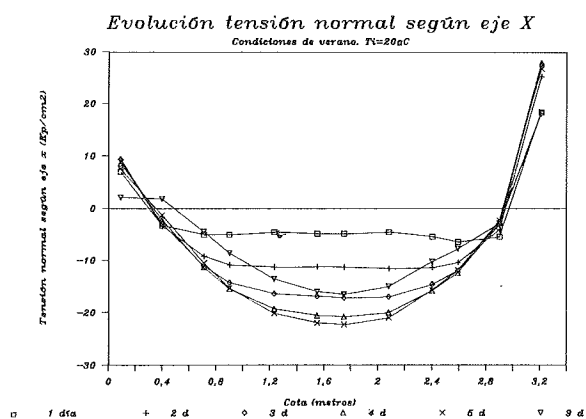


Fig. 14. Distribuciones de tensiones  $\sigma_x$  según el eje vertical de puntos de Gauss más próximo al eje vertical de simetría del bloque.

En dichas gráficas se aprecia que, para el primer día, la tensión  $\sigma_x$  en el punto de Gauss de mayor cota es de tracción y su valor es de 18,4 Kp/cm<sup>2</sup>. También en el punto de Gauss de menor cota se induce una tensión de tracción, aunque de menor magnitud, de 7,0 Kp/cm<sup>2</sup>. Por otra parte, en la zona central del bloque el estado de tensiones inducido por la acción del calor de fraguado es de compresión. Dicha distribución

tensional se mantiene cualitativamente para todos los días del análisis y, evidentemente, es resultado directo de la propia distribución de temperaturas (mayor temperatura en el interior que en el exterior del bloque).

Ello se traduce en un estado tensional en el que la zona central del bloque se encuentra comprimida y la franja perimetral del bloque, con un ancho aproximado de 0,40 m de espesor, se encuentra traccionada. Observando en la figura 14 la gráfica de distribución de tensiones correspondientes al 4º día, se observa que la tensión  $\sigma_x$  es máxima, su valor es de 27,7 Kp/cm<sup>2</sup> y tiene lugar para el punto de Gauss de mayor cota. A partir de ese instante, las tensiones de tracción  $\sigma_x$  en la parte superior del bloque disminuyen, aumentando las compresiones en el interior del bloque; la tensión máxima  $\sigma_x$  de compresión es de -22,3 Kp/cm<sup>2</sup>, aparece al 5º día y tiene lugar en aquellos puntos de Gauss cercanos al plano horizontal de simetría del bloque, como era de esperar. A partir del 4º y 5º día, aproximadamente, la magnitud de las tensiones térmicas va disminuyendo (véase la gráfica correspondiente al 9º día), concluyéndose, por consiguiente, que la situación más desfavorable, en lo que se refiere al comportamiento del bloque desde un punto de vista tensional, se concentra en los cuatro primeros días; para estos días, el hormigón del bloque no ha desarrollado su resistencia a compresión y tracción y, sin embargo, se ve sometido a las máximas tensiones térmicas  $\sigma_x$  inducidas por la acción del calor de fraguado.

A idénticas conclusiones se llega observando la evolución de las distribuciones de tensiones  $\sigma_y$  a lo largo del eje vertical próximo al de simetría del bloque (véase figura 15). En este caso la máxima tensión de tracción  $\sigma_y$  es de 30,0 Kp/cm<sup>2</sup>, aparece también al 4º día y tiene lugar en el punto de Gauss más cercano a la cara superior del bloque.

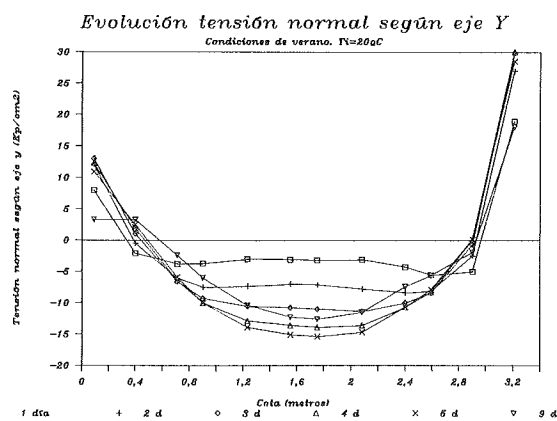


Fig. 15. Distribuciones de tensiones  $\sigma_y$  según el eje vertical de puntos de Gauss más próximo al eje vertical de simetría del bloque.

Lógicamente, si las tensiones máximas  $\sigma_x$  y  $\sigma_y$  de tracción solicitaran una zona muy localizada del bloque, la situación de éste, desde un punto de vista tensional, no sería excesivamente preocupante. No obstante, como puede apreciarse en la figura 16, ello no es así. En dicha figura se quiere representar la magnitud de la tensión principal de tracción  $\sigma_1$  de todos los puntos de Gauss con mayor cota, más próximos a la cara superior del bloque, correspondiente al 4º día de análisis.

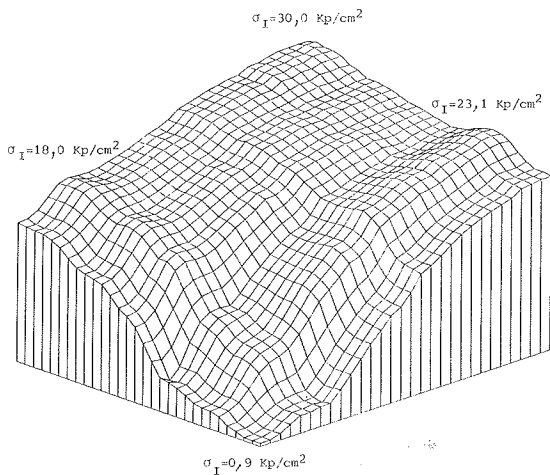


Fig. 16. Magnitud de las tensiones principales de tracción  $\sigma_1$  en la cara superior del bloque, a las 96 horas ( $T_i = 20^\circ\text{C}$ ).

Puede observarse que la totalidad de la cara superior del bloque se encuentra traccionada y que la zona central de dicha cara, circundante al eje vertical de simetría, se ve sometida a unas tensiones principales  $\sigma_1$  de magnitud algo inferior pero cercana a la tracción principal máxima. Ello muestra que las tensiones de tracción que aparecen, no actúan de forma localizada sino que solicitan grandes zonas del bloque.

Cabe ahora cuantificar, en primera aproximación, la evolución de la resistencia a tracción del hormigón. Para ello, se parte de la relación existente entre la resistencia a compresión y el módulo de deformabilidad [expresión (7)]. Conocido este último, en el cual se ha considerado la madurez del hormigón, se determina la resistencia a compresión del hormigón y, a su vez, conocida ésta, puede determinarse, de forma aproximada y algo simplista, el valor de la resistencia a tracción del hormigón, a través de la expresión recogida en la normativa vigente EH-88 (4).

$$f_t = 0,45 \sqrt[3]{f_c^2} \quad (11)$$

En la figura 17 se muestra la evolución de la tensión principal de tracción  $\sigma_1$  y de la resistencia a tracción del hormigón, para los diez primeros días del análisis.

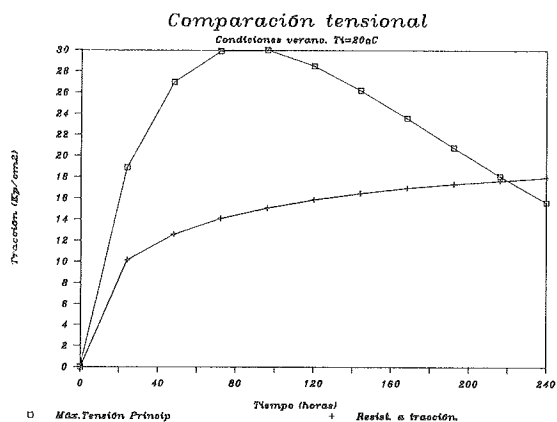


Fig. 17. Evolución de la tensión principal mayor  $\sigma_1$  en cualquier punto del bloque analizado y de la resistencia a tracción del hormigón.

A la vista de los resultados obtenidos en el análisis tensional del bloque, puede concluirse que las tensiones obtenidas en amplias zonas de aquél, superan claramente los valores estimados de la resistencia a tracción del hormigón; y ello ocurre para los nueve primeros días, aunque de forma mucho más acusada para los cuatro primeros.

## 5. CONCLUSIONES

Como principal consideración final de este estudio, cabe concluir que la magnitud de las tensiones térmicas inducidas en el bloque macizo analizado, de dimensiones  $3,30 \times 4,0 \times 3,30 \text{ m}$ , debidas a la acción del calor de fraguado, superan claramente la resistencia a tracción del hormigón a lo largo de los primeros días después de finalizar la operación del hormigonado; y ello no tiene lugar de forma localizada, puesto que todas las caras exteriores del bloque se encuentran traccionadas y con unos niveles de tensión ciertamente elevados con respecto a la resistencia a tracción del hormigón.

Conviene puntualizar que algunos de los parámetros y de los condicionantes iniciales de diseño, hacen que los resultados derivados del análisis, en lo que se refiere a la respuesta tensional del bloque, sean más desfavorables. Así, por ejemplo, una disminución de la relación agua/cemento del hormigón confeccionado mediante el empleo de aditivos que mejoraran la trabajabilidad y que retardaran el proceso de fraguado, supondría una disminución de la velocidad de generación interna de calor, lo cual se traduciría en unas distribuciones tensionales de menor magnitud, las cuales, si fueran críticas, lo serían con un desfase temporal de varios días, con respecto al caso particular estudiado. Para ese instante de tiempo, el hormigón ya habría desarrollado un porcentaje más elevado de su

resistencia a tracción. Asimismo, una disminución de la temperatura inicial de la mezcla mediante el enfriamiento de los diferentes componentes de la mezcla de hormigón, daría también como resultado una disminución de la magnitud de las tensiones térmicas inducidas. Lógicamente, pueden plantearse otras actuaciones que tengan como objetivo primordial el prevenir y paliar, en la medida de lo posible, los efectos perjudiciales de la potencial fisuración originada por el calor de fraguado, si bien conllevan implicaciones de carácter técnico y, fundamentalmente, económico, e incluso cambios en la propia geometría predimensionada del bloque (bloque aligerado).

Sin embargo, cabe hacer hincapié en que el estudio realizado y presentado en este artículo pretende ser bastante representativo de la problemática existente en grandes estructuras masivas de hormigón, frente a la acción del calor de fraguado y que, en cualquier caso, para afrontar el análisis térmico y tensional de una forma más o menos rigurosa, se hace necesario el caracterizar el hormigón desde un punto de vista térmico, y fundamentalmente, en todo aquello que haga referencia a la determinación de la curva de generación interna de calor durante el proceso de fraguado y endurecimiento del hormigón.

Por último, cabe comentar que la consideración en el modelo de análisis tensional de la relajación de las tensiones térmicas debida al efecto diferido de la fluencia, supondría una respuesta más satisfactoria en lo que se refiere a la magnitud de las tensiones inducidas por efecto del calor de fraguado. Por otra parte, un modelo de fisuración basado en la teoría de la mecánica de fractura, permitiría comprender mejor el fenómeno de aparición y propagación de fisuras en grandes bloques de hormigón sometidos a la acción del calor de fraguado. No obstante, la consideración en el modelo de ambos efectos, cae fuera de los objetivos perseguidos en este artículo, dejando este estudio para una futura investigación.

## AGRADECIMIENTOS

Sirva este apartado para agradecer a la Dirección Técnica del Puerto Autónomo de Bilbao, el soporte económico necesario para llevar a cabo el presente estudio y la tarea experimental desarrollada a lo largo del mismo.

## BIBLIOGRAFIA

1. ACI Committee 207: "Mass Concrete for Dams and other Massive Structures". ACI Manual of Concrete Practice. Part 1. Materials and General Properties of Concrete. American Concrete Institute. Detroit, 1980.

2. ACKER, P.: "Effets Thermiques dans les bétons en cours de fabrication et applications aux ouvrages d'art". Annales de L'Institut Technique du Batiment et des Travaux Publics. No. 442. Série: Béton 235. Paris. Février, 1986.

3. BRANCO, F., MENDES, P.: "Heat of Hydration Temperature in Bridges". RILEM. International Congress on From Materials Science to Material Engineering. Vol. 2. Paris, 1987.

4. EH-88: "Instrucción para el proyecto y la ejecución de obras de hormigón en masa o armado". Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo. Comisión Permanente del Hormigón. 1988.

5. FERNANDEZ, J.A.: "Estudio experimental de la evolución de las características mecánicas del hormigón curado en diversas condiciones y su aplicación al cálculo de los procesos de descimbrado". Tesis Doctoral. E.T.S.I.C.C. y P. de Madrid. U.P.M. Enero, 1986.

6. HOLLADAY, N.C.: "Concrete Temperature Control during Dam Construction". Water Power & Dam Construction. May, 1987.

7. INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA: "Guía resumida del clima de España". Servicio de Climatología. Ministerio de Transportes, Turismo y Comunicaciones. Madrid, 1982.

8. INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA: "Atlas de la radiación solar en España". Ministerio de Transportes, Turismo y Comunicaciones. Madrid, 1984.

9. MACHIDA, N., UEHARA, K.: "Nonlinear Thermal Stress Analysis of a Massive Concrete Structure". Computers & Structures, Vol. 26, No. 1/2. 1987.

10. PAULON, V.A., SAAD, M.N.A.: "Preventive Measures to Avoid Cracks due to Temperature Changes in Mass Concrete". Quinzième Congrès des Grands Barrages. Lausanne, 1985.

11. PITKANEN, P.: "Prediction of Temperature Fields of Massive Concrete Structures during Hardening". Nordic Concrete Research. Publication No. 3, 1984.

12. RASTRUP, E.: "Heat of Hydration in Concrete". Magazine of Concrete Research, Vol. 6, No. 17. September, 1954.

13. TOWNSEND, C.L.: "Control of Cracking in Mass Concrete Structures". United States Department of the Interior. Bureau of Reclamation. A Water Resources Technical Publication. Engineering Monograph. No. 34. Washington. October, 1965.

14. UKRAINIČIK, V., MIKULIČ, D., MEKHILE, Y.: "Cracks in Mass Concrete at Early Ages in Haditha Dam". Quinzième Congrès des

Grands Barrages. Lausanne, 1985.

15. VAN BREUGEL, K.: "Artificial Cooling of Hardening Concrete". Delft University of Technology. Faculty of Civil Engineering. Department of Structural Concrete. Report 5-80-9. April, 1980.

16. VAN DAMME, L., TAERWE, L., DE-DEYNE, R., DE ROUCK, J.: "Quality and Durability of Concrete Armour Units". XXI Coastal Engineering Conference. Vol. 1, No. 156. ASCE. Málaga, Spain. June, 1988.

17. YAMAZAKI, M., MIYASHITA, T., MORIKAWA, H., HAYAMI, Y.: "An Analytical Study on the Thermal Stress of Mass Concrete". Kajima Institute of Construction Technology. KICT Report, No. 57. Tokyo. March, 1985.

## RESUMEN

En este artículo se presenta un estudio analítico y experimental relativo a la respuesta térmica y tensional de estructuras masivas de hormigón sometidas a la acción del calor de fraguado. Se han llevado a cabo medidas experimentales de temperatura, en el interior de grandes bloques cúbicos de hormigón, en condiciones cuasi-adiabáticas y no adiabáticas. La contrastación de los resultados experimentales con los derivados del modelo analítico, han permitido caracterizar el hormigón desde un punto de vista térmico, en lo que se refiere a la curva de generación interna de calor durante el fraguado. El modelo de análisis térmico y tensional utiliza-

do en este estudio, se basa en una formulación de elementos finitos tridimensionales. Los resultados derivados de la experimentación y del análisis térmico permiten concluir que las distribuciones de temperaturas generadas en el interior de estructuras masivas de hormigón, debidas al calor de fraguado, son fuertemente no lineales. Ello se traduce en la aparición de tensiones de tracción en la superficie a tracción del hormigón en primeras edades y que podrían afectar a la durabilidad de la propia estructura.

## SUMMARY

In this paper a theoretical and experimental study about temperature and stress distributions induced in massive concrete structures during hardening process is presented. Measurements of temperature in several points of concrete blocks in quasi-adiabatic and non-adiabatic conditions have been carried out. A comparison between experimental and analytical results allows to determine the evolution of hydration heat of concrete. The analytical model developed, capable to predict temperature and stress distributions, is based on 3-D finite element method. The results derived from thermal and structural analyses show that the temperature distributions within massive concrete structures are strongly nonlinear. Due to this fact, significant tensile stresses might appear at the external surface of the structure during the hardening process, which can exceed the value of the tensile strength of concrete.