

Capítulo

7

**Propuesta metodológica
para la optimización
de cemento**

7.1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

En este capítulo se presenta el desarrollo de la metodología propuesta para realizar la optimización de los consumos de cemento en el hormigón en verano. Los principales aspectos tratados aquí tienen relación con algunos fundamentos teóricos sobre la dependencia de la resistencia del hormigón con la temperatura, la temperatura del hormigón en los primeros instantes y posteriormente, el calor de hidratación y la transferencia o absorción de temperatura de éste al ambiente.

Posteriormente se define el plan de trabajo correspondiente a la campaña experimental llevada a cabo con el objeto de validar y contrastar la metodología planteada. En este sentido se precisan algunos detalles relacionados con las variables estudiadas, condiciones térmicas simuladas, materiales y dosificaciones utilizados, etc.

Por último se presentan y analizan los resultados obtenidos, mostrando el comportamiento térmico del hormigón y la concordancia de las curvas térmicas obtenidas con las programadas y con las estimadas numéricamente por medio de la herramienta desarrollada. Asimismo se muestran los resultados correspondientes al hormigón en estado fresco (trabajabilidad) y en estado endurecido (resistencia a compresión a 7 y 28 días).

El objetivo principal de este capítulo es describir el desarrollo de la metodología propuesta, teniendo en cuenta que deberá ser programable e implementable a nivel industrial sobre las plantas de producción de hormigón preparado. Asimismo verificar y validar la viabilidad de dicha metodología sobre hormigones elaborados a diferentes horas del día dentro de un ciclo de temperatura variable y aplicando al mismo tiempo una política escalonada de sobredosificación de cemento.

Esta política escalonada de sobredosificación viene dada en un principio en base a la temperatura inicial y máxima que pueda alcanzar un hormigón, en función de las temperaturas ambientales de un día dado y de la hora en que sea fabricado.

Los datos de partida para tal formulación fueron una combinación entre el planteamiento teórico-térmico y las experiencias aprendidas a lo largo de los trabajos incluidos en esta tesis. En este sentido se analizaron numéricamente todas las posibles combinaciones en función de la temperatura ambiental y la hora del día, teniendo como restricción que las sobredosificaciones se harían para temperaturas mayores a 21 °C a las 7 horas y que antes de las 7:00 horas y a partir de las 17:00 horas no habría sobredosificación de cemento. Asimismo, los intervalos de temperatura ambiental fueron ajustados de tal forma que los consumos de cemento fueran múltiplos de 5 kg/m³, con el objeto de facilitar la implementación manual en la producción, cuando sea necesario.

Por otro lado, la herramienta numérica desarrollada es fácilmente programable en una hoja de cálculo, sin tener que hacer uso de métodos muy sofisticados, por lo tanto su programación en cualquier lenguaje informático es muy sencilla.

Los objetivos específicos de esta serie experimental son los siguientes:

- Simular las condiciones climáticas variables de verano mediante la cámara climática (ciclo diario de temperatura y humedad relativa).
- Verificar la correcta simulación y correspondencia entre valores programados y obtenidos realmente.
- Fabricar hormigones a diferentes horas del día y con diferentes contenidos de cemento.
- Determinar las propiedades en estado fresco (trabajabilidad) y endurecido (resistencia a compresión a 7 y 28 días) de los hormigones fabricados.
- Analizar los resultados obtenidos en función de su naturaleza (térmicos y mecánicos) y compararlos con las tendencias observadas en los ensayos con hormigón realizados en el **Capítulo 4**.
- Validar el funcionamiento de la metodología tanto en el ámbito térmico como en el relacionado con la política de dosificaciones en función de los resultados de resistencia obtenidos.
- Formular las conclusiones pertinentes en función de las tendencias principales observadas.

7.2 DESARROLLO ANALÍTICO DE LA METODOLOGÍA

7.2.1 Calor de hidratación del hormigón

La hidratación puede ser definida como “la reacción química entre el cemento hidráulico y el agua”. [ACI Committee 116, 2000] El proceso por el cual el cemento Portland es hidratado es complejo en su naturaleza y no es todavía completamente entendido. En este sentido, durante la hidratación del cemento Portland, toman parte reacciones simultáneas e interdependientes, las cuales involucran algunos compuestos como silicatos cálcicos (C_3S , C_2S), aluminato tricálcico (C_3A), ferroaluminato tetracálcico (C_4AF), cal libre (óxido de calcio), sulfatos alcalinos, yeso y agua. [Hewlett, 2001]

La hidratación del cemento Portland es fundamentalmente una reacción exotérmica, ya que se libera calor durante este proceso. El calor de hidratación del cemento es definido por el [ACI Committee 116, 2000] como “el calor desarrollado debido a la reacción química con el agua, el cual se genera durante el fraguado y endurecimiento del cemento Portland”. La cantidad de calor liberado y la velocidad de liberación de calor dependen de ciertos parámetros como la finura del cemento, la distribución de partículas [Knudsen, 1982], la relación agua/cemento, la temperatura inicial, la composición del cemento y la presencia y cantidad de adiciones minerales o aditivos químicos [van Breugel, 1998]. Un incremento en la finura del cemento, en la relación agua/cemento o en la temperatura ocasionaría un incremento en la velocidad inicial de hidratación, por lo tanto se incrementaría la velocidad de generación de calor.

El calor liberado durante la hidratación del cemento produce un incremento en la temperatura del hormigón. [ACI Committee 207, 1998] El calor generado por el hormigón durante la hidratación se acumulará continuamente y se aproximará a la entalpía total de la reacción [Bogue, 1947], lo cual resultará en un incremento de temperatura.

Existen varios métodos experimentales para determinar el calor de hidratación del cemento, y una vez conocida la cantidad total de calor liberada por el cemento, se puede relacionar dicho calor con la ganancia de temperatura en el hormigón a través de su calor específico.

Como se menciona en el **Capítulo 2**, bajo condiciones adiabáticas (se considera que un cuerpo se encuentra en condiciones adiabáticas cuando no hay intercambio de energía calorífica entre éste y el entorno que le rodea), la temperatura del hormigón en un momento dado es igual a la temperatura inicial más el calor total generado hasta ese momento y dividido entre el producto del calor específico por el peso específico del hormigón. En este caso el calor específico del hormigón es función de los calores específicos de cada componente y de la proporción de éstos en el hormigón.

7.2.2 Influencia de los factores externos

El apartado anterior (7.2.1) proporciona las bases para la estimación de la temperatura del hormigón cuando los factores externos no tienen influencia y por lo tanto no afectan al sistema. Cuando se analiza el hormigón en condiciones reales, el desarrollo de la temperatura es más complejo ya que los factores externos tienen efectos sobre el comportamiento del hormigón.

Entre los factores externos que afectan térmicamente al hormigón durante el proceso de hidratación podemos mencionar los siguientes: volumen de hormigón, temperatura ambiental, humedad relativa, superficie de transmisión de calor, conductividad del hormigón, aislamientos, etc. En este sentido es necesario conocer estos valores para poder realizar una predicción sobre el desarrollo de calor del hormigón. [Morabito, 1998]

Para determinar el desarrollo de la temperatura y su distribución en estructuras de hormigón, la complejidad del problema radica en la interacción de los fenómenos relacionados: temperatura inicial, desarrollo de temperatura y transferencia térmica entre el hormigón y el ambiente. La temperatura inicial del hormigón es función de la temperatura de sus componentes en el momento en que estos sean mezclados. La transferencia de calor entre el hormigón y los materiales adyacentes es controlada por medio de gradientes térmicos y la conducción térmica. La transferencia de calor de la superficie de un cuerpo (hormigón) hacia un fluido en movimiento (aire) es en este caso controlada por la temperatura y la convección térmica. [Mills, 1999]

El flujo de calor por conducción (q) se expresa por la siguiente ecuación:

$$q = -k \left(\frac{dT}{dx} \right)$$

donde:

q = flujo de calor por área
 k = conductividad térmica del medio en cuestión
 dT/dx = gradiente de temperatura

El flujo de calor por convección (q) se expresa por la siguiente ecuación:

$$q = h \cdot dT$$

donde:

q = flujo de calor por área
 h = coeficiente de convección
 dT = diferencia de temperatura entre superficie y fluido

El flujo de calor en las dos ecuaciones anteriores está definido como transferencia de calor por unidad de tiempo. Para el caso de conducción, la conductividad térmica, el gradiente de temperatura y la forma y tamaño de la estructura gobiernan el flujo de calor. En este sentido, bajas conductividades térmicas, pequeñas diferencias de temperatura o grandes distancias resultarán en una mínima transferencia de calor.

En general, el hormigón, la madera, los suelos y los materiales aislantes presentan valores de conductividad relativamente bajos, lo que significa que estos transfieren el calor muy lentamente. El acero y los metales tienen valores de conductividad relativamente altos, lo que significa que transfieren el calor más rápidamente. En la **tabla 7.1** se presentan algunos valores de conductividad para varios tipos de materiales de construcción.

Material	Conductividad térmica (kcal/hr·m ² ·°C)	Autor
Hormigón	1,204; 1,032 - 3,009	Mills, 1999; van Breugel, 1998
Acero inoxidable	12,898	Mills, 1999
Acero	55,030	Mills, 1999
Fibra de vidrio	0,030; 0,033	Mills, 1999; Arpaci et al., 1999
Madera	0,005 - 0,146; 0,103 - 0,138	Mills, 1999; Arpaci et al., 1999
Suelo	0,860; 1,720	Mills, 1999
Relleno (terraplén)	0,033; 0,035	Mills, 1999; Arpaci et al., 1999

Tabla 7.1.- Valores típicos de conductividad térmica para algunos materiales de construcción

Examinando las ecuaciones de transferencia de calor, se pone de manifiesto la importancia de los factores externos en el desarrollo de la temperatura en el hormigón. Una estructura de hormigón tendrá diferente evolución térmica dependiendo del sitio en que se encuentre, en función del calor generado y del calor transferido al ambiente. Las probetas cilíndricas de hormigón curadas al pie de la obra generalmente serán más afectadas por las condiciones ambientales que la propia estructura de hormigón.

Como parte de esta tesis, se analizan las pérdidas de resistencia del hormigón en verano medidas a través de probetas cilíndricas de hormigón, por lo tanto, dado el enfoque de este trabajo, se estudiará la evolución térmica del hormigón medida en probetas cilíndricas, las cuales estarán influenciadas por las condiciones ambientales (factores externos).

7.2.3 Temperatura ambiente

El carácter cíclico diario presentado por la evolución de la temperatura ambiente en el tiempo puede moldearse matemáticamente a través de la utilización de funciones bilineales, biparabólicas y senoidales. En cualquiera de los casos, se hace necesario introducir como datos de partida las temperaturas ambiente máxima (T_{max}) y mínima

(T_{\min}) diarias así como las horas del día para las cuales aparecen dichos máximos y mínimos, h_{\max} y h_{\min} , respectivamente. Para tener una mayor precisión en los ajustes numéricos de los datos reales es preferible utilizar las funciones senoidales ya que estas presentan una mejor correlación con las tendencias térmicas cíclicas presentadas a lo largo del día. Debido a esto se propone utilizar una función “seno” para reproducir numéricamente los datos de temperatura en función de la hora del día. [Calmon, 1995]

A continuación se muestra la función que define el comportamiento variable de la temperatura ambiental diaria, así como la gráfica en donde se representan las variables utilizadas en dicha función (**figura 7.1**):

$$T = A \operatorname{sen} \left(2\pi \frac{t - b_1}{2b_2} \right) + B$$

donde:

$$A = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{2}$$

$$B = \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2}$$

$$b_1 = \frac{h_{\max} + h_{\min}}{2}$$

$$b_2 = h_{\max} - h_{\min}$$

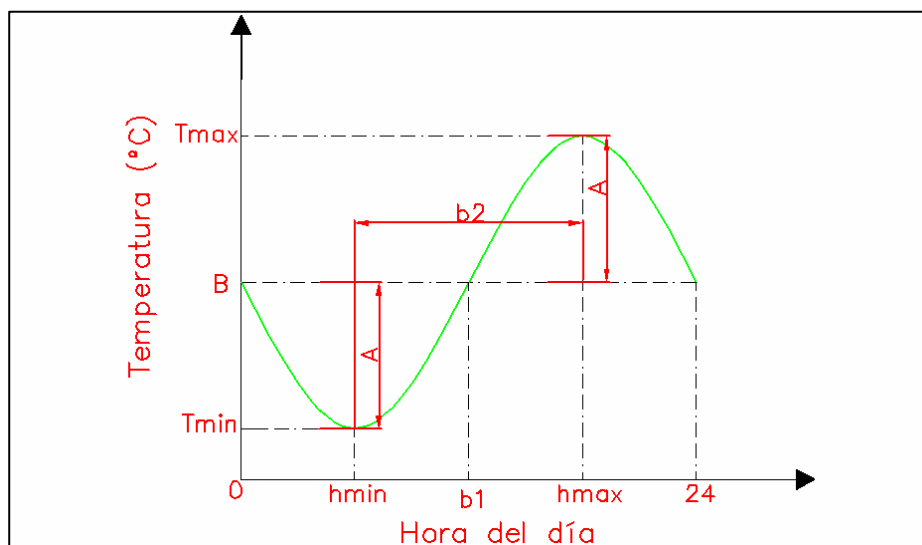


Figura 7.1.- Función sinusoidal de la temperatura ambiental

En este caso, para conocer los datos de T_{max} y T_{min} cada día, se hizo un análisis estadístico de las temperaturas mínimas, máximas y a las 7:00 horas de todos los días de los meses de verano (junio, julio y agosto) de los últimos 9 años (1997-2005), con el objeto de poder predecir con cierta certeza estadística, por ejemplo 95%, las temperaturas máximas y mínimas de cualquier día en base a la temperatura que se tenga a las 7:00 horas.

Este análisis estadístico se formuló en base a las distribuciones de frecuencia de las temperaturas, las cuales se ajustaban a una morfología “gaussiana” y por lo tanto pueden ser modeladas estadísticamente por medio de una función de probabilidad normal ó t-Student.

Para realizar dicho análisis estadístico se tomaron los registros diarios de los 3 meses y se dividieron en intervalos de ± 1 °C en función de la temperatura inicial (7:00 hrs.) y se obtuvieron parámetros estadísticos como la media y la desviación estándar para las temperaturas a las 7:00 hrs., para las temperaturas máximas y para las temperaturas mínimas.

A continuación se muestra la **figura 7.2** en la cual se han graficado los datos correspondientes a las temperaturas a las 7:00 horas y a las temperaturas máximas y mínimas, en forma de distribución de frecuencia y al mismo tiempo se ha trazado la curva de distribución normal teórica de esos datos en base a la media y la desviación estándar de cada distribución.

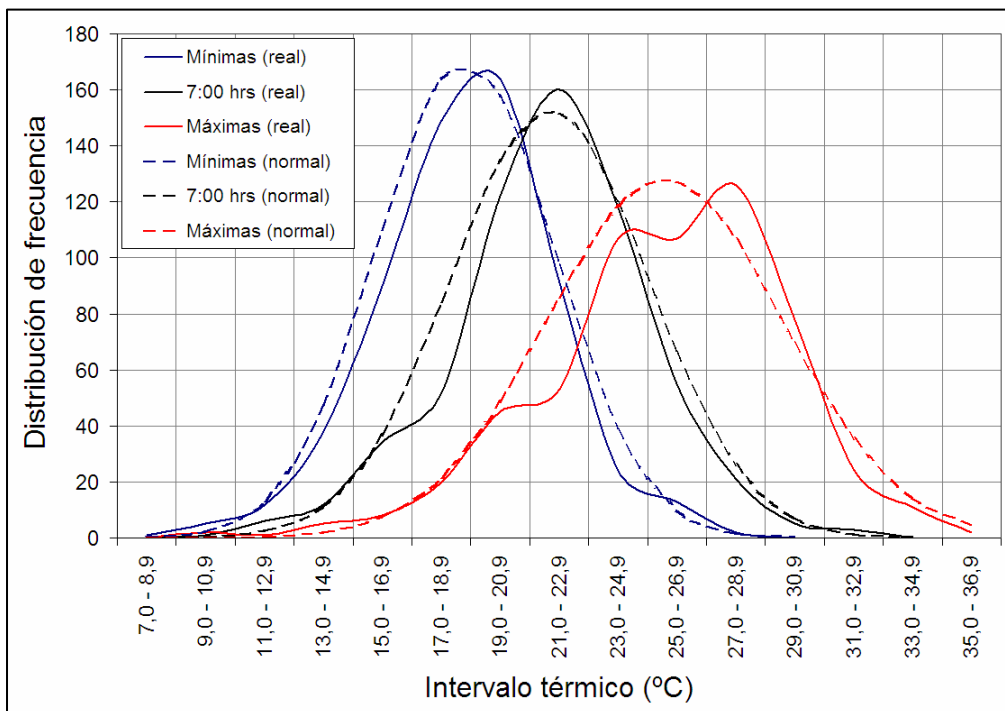


Figura 7.2.- Distribuciones de frecuencia de las temperaturas

Cabe mencionar que aunque las distribuciones de frecuencia presentan un comportamiento “normal” no sería correcto ajustar los datos mediante este tipo de función de probabilidad debido a que el tamaño de la muestra es muy pequeño en comparación con lo que sería el tamaño de la población total. Por lo anterior se sugiere utilizar la distribución de probabilidad de t-Student la cual es muy apropiada para muestras pequeñas y que también se ajusta a distribuciones de frecuencia que presentan una tendencia gaussiana. Las probabilidades de esta distribución son calculadas a partir de los grados de libertad de la distribución, es decir de ‘n-1’, donde ‘n’ es el número total de registros o tamaño de la muestra. En el **Anejo D** se presenta el desarrollo formulado para este análisis estadístico y el cálculo de las temperaturas, en la **tabla D.4** se incluye un resumen de las temperaturas mínimas y máximas en función del intervalo térmico a las 7:00 horas.

Los valores de h_{\min} y h_{\max} pueden ser considerados como 0:00 y 12:00 horas, respectivamente.

7.2.4 Temperatura inicial del hormigón

La temperatura de la masa fresca del hormigón es fácil de determinar en base a la teoría de mezclas si se conoce la temperatura de los componentes, lo cual es posible. La del cemento y agua a través de las mediciones tradicionales y la de los áridos a través de las estimaciones hechas mediante el ensayo de inercia térmica y contrastada por mediciones en los acopios. Asimismo se puede conocer el calor específico de los constituyentes y la capacidad calorífica del hormigón.

La función para obtener el valor de la temperatura inicial (T_i) en función de la temperatura de los componentes se muestra a continuación. Debajo de la ecuación se muestra el significado de las variables y constantes implicadas.

$$T_i = \frac{T_a \cdot M_a \cdot c_a + T_a \cdot M_{wa} + T_c \cdot M_c \cdot c_c + T_w \cdot M_w}{M_a \cdot c_a + M_{wa} + M_c \cdot c_c + M_w}$$

donde:

- T_i = temperatura inicial del hormigón (°C)
- T_a = temperatura de los áridos (°C)
- M_a = masa total de los áridos (kg/m^3)
- c_a = calor específico del árido ($\text{kcal/kg}\cdot^\circ\text{C}$)
- M_{wa} = masa de agua contenida en los áridos (kg/m^3)
- T_c = temperatura del cemento (°C)
- M_c = masa total de cemento (kg/m^3)
- c_c = calor específico del cemento ($\text{kcal/kg}\cdot^\circ\text{C}$)
- T_w = temperatura del agua de amasado (°C)
- M_w = masa total de agua de amasado (kg/m^3)

La temperatura de los áridos tiene relación directa con la temperatura ambiental y puede simularse en base a los coeficientes de inercia térmica (ver **apartado 5.5 del Capítulo 5**), en función del tipo de árido (conductividad térmica), tipo de almacenamiento (relación superficie/volumen y material), calor específico y densidad. La siguiente fórmula arroja el valor de la temperatura de los áridos en un momento 'n' dado, en base a los factores mencionados.

$$T_{a_n} = T_{a_j} - \left[\frac{ka \cdot Sa}{V_a \cdot ca \cdot Ma} \sum_{n=j}^{n=t} (T_{a_{n-1}} - T_n) \Delta t \right]$$

donde:

- T_{a_n} = temperatura de los áridos, en el momento 'n' (°C)
- T_{a_j} = temperatura de los áridos, en el momento 'j' (última temperatura del árido en el día anterior (°C))
- ka = conductividad térmica de los áridos (kcal/hr·m²·°C)
- Sa = superficie de transferencia térmica (m²)
- V_a = volumen de áridos (m³)
- ca = calor específico de los áridos (kcal/kg·°C)
- Ma = masa total de los áridos (kg/m³)
- T_n = temperatura ambiental, en el momento 'n' (°C)

7.2.5 Evolución de la temperatura del hormigón

Como se mencionó anteriormente, la temperatura que puede alcanzar el hormigón está en función del calor de hidratación del cemento y de las condiciones de contorno (influencia de los factores externos).

Desarrollo de temperatura en condiciones adiabáticas

Como se menciona en el **Capítulo 2**, el incremento de calor adiabático de temperatura del hormigón es directamente proporcional al consumo y calor de hidratación del cemento o conglomerante utilizado e inversamente proporcional a la capacidad calorífica del hormigón. Estudios llevado a cabo sobre los diferentes factores que pueden influir en el incremento de temperatura, indican que el tipo de cemento o conglomerante y su dosificación son los factores más decisivos.

Los compuestos principales del cemento (C₃S, C₂S, C₄AF y C₃A) liberan cantidades diferentes de calor durante las reacciones de hidratación. Por lo tanto la cantidad de calor liberada, responsable de la elevación adiabática de temperatura, está directamente relacionada con la composición química del cemento utilizado.

La finura de molido influye solamente en la velocidad del desarrollo de las reacciones de fraguado, pero no interviene en el valor final de la cantidad total de calor

generado. Por ello, curvas de elevación adiabática de temperatura pueden presentar desarrollos iniciales diferenciados en función de la finura de molido.

Los aditivos retardadores y aceleradores de fraguado influyen principalmente en las velocidades de elevación de temperatura del hormigón en primeras edades, ya que cambian las velocidades de reacciones de hidratación del cemento y consecuentemente la cantidad de calor liberado.

Asimismo, la utilización de materiales puzolánicos influye de manera decisiva en el desarrollo de la curva de incremento de calor adiabático y en el valor final del mismo. La sustitución de parte del cemento por materiales puzolánicos provoca un descenso acentuado en la velocidad de subida de la temperatura del hormigón y en el valor final de la misma.

Por último, cabe apuntar que el calor específico y el peso específico del hormigón poseen poca influencia sobre el valor del incremento adiabático de temperatura.

El incremento adiabático de la temperatura del hormigón (ΔT) puede determinarse a través de la siguiente relación:

$$\Delta T = \frac{C \cdot H}{c_H \cdot \rho}$$

donde:

- C = masa total de cemento (kg/m^3)
- H = calor de hidratación del cemento (kcal/kg)
- c_H = calor específico del hormigón ($\text{kcal/kg} \cdot ^\circ\text{C}$)
- ρ = peso específico del hormigón (kg/m^3)

El calor de hidratación del cemento puede determinarse por medio del ensayo especificado en la norma UNE 80-118-86, en este caso se puede tener el valor del calor de hidratación en función del tiempo y de esta forma construir gráficamente el perfil térmico del hormigón. El calor específico del hormigón (c_H) puede obtenerse mediante la relación entre la capacidad calorífica del hormigón (Q_H) y el peso específico del hormigón (ρ):

$$c_H = \frac{Q_H}{\rho}$$

A su vez, la capacidad calorífica del hormigón (Q_H) puede obtenerse mediante la siguiente fórmula:

$$Q_H = c_a \cdot M_a + c_c \cdot M_c + M_w + M_{wa}$$

donde:

Q_H = capacidad calorífica del hormigón (kcal/m³·°C)

c_a = calor específico del árido (kcal/kg·°C)

M_a = masa total de los áridos (kg/m³)

c_c = calor específico del cemento (kcal/kg·°C)

M_c = masa total de cemento (kg/m³)

M_w = masa total de agua de amasado (kg/m³)

M_{wa} = masa de agua contenida en los áridos (kg/m³)

Desarrollo de temperatura en condiciones no adiabáticas

Una vez obtenido el perfil correspondiente al incremento de temperatura del hormigón en condiciones adiabáticas, habría que determinar la transferencia de temperatura al ambiente, con el objeto de conocer el incremento de temperatura del hormigón bajo condiciones no adiabáticas e isotérmicas.

Lo anterior puede hacerse por medio de la norma [UNE 80-118-86](#), mediante la aplicación de la ecuación de calor de hidratación (q) siguiente:

$$q = \frac{C}{m_c} \theta + \frac{1}{m_c} \sum_0^t (a \cdot \theta) \Delta t$$

donde:

q = calor de hidratación del cemento (J/g)

C = capacidad térmica total del calorímetro y de la probeta (J/°C)

m_c = masa de cemento contenido en la probeta (g)

t = duración de la hidratación (hr)

a = coeficiente de transmisión térmica global (J/hr·°C)

θ = calentamiento de la probeta, en el instante 't' (°C)

El primer término de la ecuación representa el calor acumulado en el calorímetro y el segundo el calor disipado hacia el exterior (calor referido a un gramo de cemento). En este caso, como conocemos el calor de hidratación (q) y el primer término de la ecuación (calor acumulado en el calorímetro), es posible despejar el segundo término (calor disipado hacia el exterior).

Así pues, es posible determinar el desarrollo de temperatura del hormigón en condiciones no adiabáticas e isotérmicas mediante la suma algebraica del incremento de temperatura adiabática y la transferencia de temperatura al ambiente.

Desarrollo de temperatura en condiciones no adiabáticas y variables

Las suposiciones hechas anteriormente en relación a la cuantificación de la temperatura generada por el hormigón en condiciones adiabáticas e isotérmicas no son funcionales para conocer la temperatura real que tendrá el hormigón y como afectará en su resistencia, ya que cuando el hormigón se encuentre dentro de los cilindros de control, éstos serán susceptibles a las condiciones térmicas ambientales.

Para pasar del incremento de temperatura en condiciones adiabáticas a condiciones no adiabáticas y no isotérmicas (variables), se elaboró un modelo numérico que será contrastado con datos reales y que fue formulado de acuerdo a trabajos hechos anteriormente.

[Rastrup, 1954], en base a investigaciones experimentales, propuso una expresión para cuantificar el calor de hidratación en procesos de temperatura variable. De igual forma, partiendo inversamente, propuso un método para estimar la temperatura del hormigón durante el proceso de fraguado y endurecimiento, basado en una función que considera el tiempo y la temperatura. A continuación se expone el planteamiento y las suposiciones básicas para desarrollar dicho método.

Si se conocen los valores de calor de hidratación del hormigón a una temperatura constante, entonces una función tiempo-temperatura permite calcular la temperatura de un espécimen en cualquier momento dado. Lo anterior se basa en las siguientes suposiciones, considerando un espécimen de hormigón sujeto a los factores externos:

- El hormigón tendrá la misma temperatura en cualquier parte del espécimen.
- La temperatura ambiente exterior que rodea al espécimen será dondequiera la misma.
- El calor específico del hormigón no tendrá variación durante el ensayo.

Durante el intervalo de tiempo Δt , el hormigón liberará la cantidad de calor $\Sigma[k \cdot S \cdot (T_h - T)]\Delta t$ al ambiente. En esta expresión k es la conductividad térmica del hormigón, S es el área de transmisión térmica, T_h es la temperatura del hormigón y T es la temperatura ambiente.

Durante el mismo intervalo de tiempo Δt el hormigón desarrollará el calor de hidratación $\Delta Q \cdot C \cdot V$ y absorberá la cantidad de calor $V \cdot c_H \cdot \rho \cdot (T_h - T)$, donde Q es el calor de hidratación del hormigón, C es el contenido de cemento en el hormigón, V es el volumen de hormigón, c_H es el calor específico del hormigón y ρ es el peso específico del hormigón. Debido a que la cantidad de calor liberada deberá ser igual a la diferencia entre la cantidad desarrollada y la cantidad absorbida, tenemos la siguiente ecuación:

$$\Sigma[k \cdot S \cdot (T_h - T)]\Delta t = \Delta Q \cdot C \cdot V - V \cdot c_H \cdot \rho \cdot (T_h - T)$$

Si $T = T_0$ y $Q = Q_0$ cuando $t = 0$ (condiciones iniciales),

$$\sum_{t=0}^t [k \cdot S \cdot (T_h - T)] \Delta t = C \cdot V \cdot (Q - Q_0) - V \cdot c_H \cdot \rho \cdot (T_h - T)$$

Agrupando y despejando tenemos,

$$T_h = T_0 + \frac{C}{c_H \cdot \rho} \cdot (Q - Q_0) - \frac{k \cdot S}{V \cdot c_H \cdot \rho} (T_h - T) \Delta t$$

En este caso, como se conocen los valores de temperatura del hormigón, calculados en base a los datos de calor de hidratación (Q) del cemento, podemos adecuar esta ecuación a los fines que nos interesan.

La siguiente función arroja el valor de la temperatura de la masa del hormigón (T_h) en un instante 'n' paso a paso, para condiciones no adiabáticas y no isotérmicas.

$$T_{hn} = T_i + T_{han} - \left[\frac{k_h \cdot S_h}{V_h \cdot c_h \cdot \rho} \sum_{n=0}^{n=t} (T_{hn-1} - T_n) \Delta t \right]$$

donde:

- T_{hn} = temperatura del hormigón, en el momento 'n' (°C)
- T_i = temperatura inicial del hormigón (°C)
- T_{han} = temperatura adiabática del hormigón, en el momento 'n' (°C)
- k_h = conductividad térmica del hormigón fresco (kcal/hr·m²·°C)
- S_h = superficie de transferencia térmica (m²)
- V_h = volumen de hormigón (m³)
- C_h = calor específico del hormigón (kcal/kg·°C)
- ρ = peso específico del hormigón (kg/m³)
- T_n = temperatura ambiental, en el momento 'n' (°C)

7.2.6 Cálculo del área bajo la curva térmica del hormigón y la diferencia en relación a la temperatura ambiental

Una vez conocidas las temperaturas inicial (T_i) y máxima (T_{max}) del hormigón, así como la distribución térmica ambiental a lo largo del día, en función de las condiciones ambientales específicas, es posible calcular el área bajo la curva térmica entre el hormigón y la temperatura ambiental.

Este valor arroja una estimación de la cantidad de energía calorífica desarrollada por el hormigón y que está en relación directa con la posterior evolución de resistencia mecánica, como ya se ha venido mencionando a lo largo de esta tesis. Este valor también está relacionado conceptualmente con la madurez del hormigón.

Una vez conocidos estos valores de área bajo la curva térmica entre el hormigón y la temperatura ambiental, es posible llevar a cabo la optimización del cemento mediante la comparación de estos datos con los valores críticos conocidos empíricamente o experimentalmente para cada tipo de cemento, utilizando un criterio escalonado.

7.2.7 Diagrama de flujo de la propuesta metodológica

A continuación se presenta en la **figura 7.3** una versión preliminar del diagrama de flujo para la optimización de cemento en el hormigón. Esta metodología propuesta podrá ser programada e integrada al sistema informático de producción de cada planta.

Este proceso puede ser llevado a cabo antes de fabricar cada hormigón de acuerdo a la hora en que se fabrique, al tipo de cemento a utilizar y a la dosificación particular de cada hormigón.

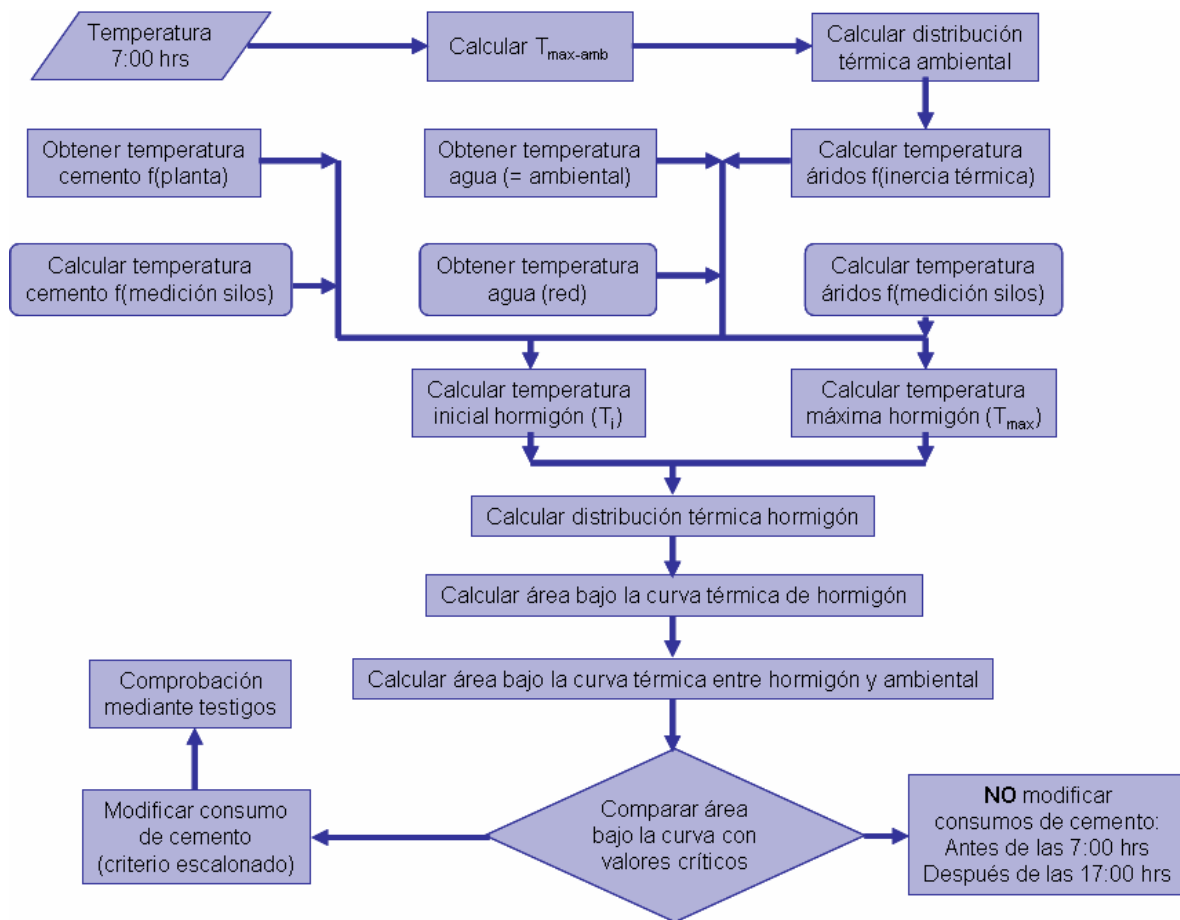


Figura 7.3.- Diagrama de flujo de la propuesta metodológica

7.3 PLAN DE TRABAJO

7.3.1 Introducción y objetivos

En el contexto del trabajo, antes de presentar los resultados debe mostrarse las condiciones en las que se ha desarrollado el mismo, cara a la reproducibilidad de los ensayos realizados.

El presente apartado tiene por objeto definir las condiciones climáticas simuladas, los materiales utilizados y los procedimientos seguidos en esta serie de ensayos, que representan las condiciones de verano. En este caso se fabricaron diferentes hormigones a diferentes horas del día, variando el consumo de cemento, agua y aditivo, con el objeto de verificar la resistencia a compresión de cada uno de ellos.

7.3.2 Condiciones climáticas simuladas

El ciclo climático simulado es el correspondiente al de verano, el cual se ha venido utilizado a lo largo del desarrollo de esta tesis, y que se define en el **apartado 3.4.1 del Capítulo 3**. En este caso se programaron los valores arrojados por el ajuste senoidal propuesto en el **apartado 7.2.3**. En la **figura 7.4** se muestra la distribución térmica ambiental y de humedad relativa programadas en la cámara climática utilizada en los ensayos, la cual se describe en el **apartado 3.3.1 del Capítulo 3**.

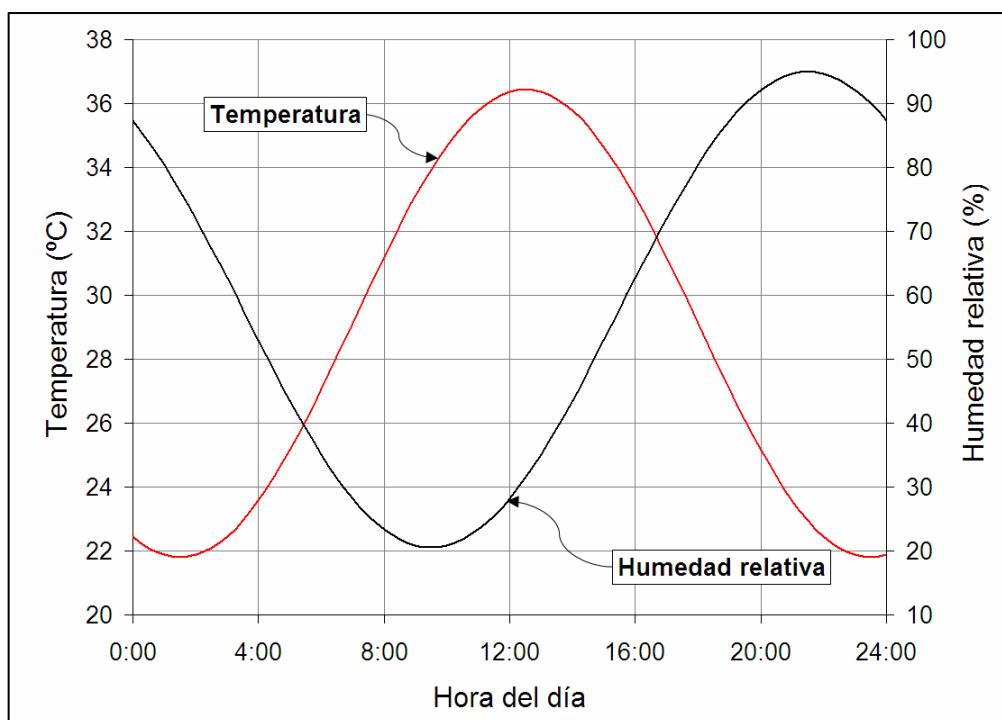


Figura 7.4.- Temperatura y humedad relativa programadas

7.3.3 Variables estudiadas y procedimiento experimental

En este estudio se pretende conocer principalmente las propiedades del hormigón en estado fresco y endurecido, es decir, la trabajabilidad y la resistencia a compresión a 7 y 28 días. En este caso se fabricaron 6 hormigones a diferentes horas del día, con la variante de que las dosificaciones de cemento eran diferentes en cada amasada con el objeto de verificar experimentalmente si el ajuste en el consumo de cemento definido para cada hora del día era el correcto. Las horas de fabricación de hormigón fueron las siguientes: 8:00 horas, 10:00 horas, 12:00 horas, 14:00 horas, 16:00 horas y 17:00 horas.

Por tal motivo se definió una ley de dosificación de cemento en función de la hora del día, basada principalmente en las experiencias obtenidas en las pasadas campañas experimentales y en el cálculo de la temperatura que se desarrolla en el hormigón para cada hora de hormigonado en función de la cantidad de cemento en base a un modelo numérico. Los detalles relacionados con la formulación de este modelo pueden consultarse en el **apartado 7.2** de este mismo capítulo.

7.3.4 Sobreconsumos de cemento en función de la hora del día

La **tabla 7.2** muestra la propuesta de sobreconsumos de cemento para cada intervalo horario del día así como la hora en que se fabricará cada hormigón.

Estos valores de sobreconsumo de cemento fueron calculados de acuerdo al diagrama de flujo presentado en el **apartado 7.2.7** de este mismo capítulo, para el ciclo térmico ambiental descrito anteriormente y en función de la dosificación del hormigón estudiado y del tipo de cemento empleado.

Intervalo (hrs)	Sobreconsumo cemento (kg/m ³)	Hora ensayo
< 07:00	0	---
07:00 - 09:00	5	8:00
09:00 - 11:00	10	10:00
11:00 - 14:00	15	12:00
14:00 - 16:00	10	14:00
16:00 - 17:00	5	16:00
> 17:00	0	17:00

Tabla 7.2.- Propuesta de sobreconsumos de cemento en el hormigón

En función de la tabla anterior, se incrementan los valores correspondientes a la dosificación original, en relación al cemento, agua y aditivo; en este caso se mantenía constante la relación agua/cemento.

7.3.5 Diseño utilizado de la mezcla de hormigón

El diseño de la mezcla utilizada corresponde a un hormigón de fabricación comercial cuya resistencia nominal es de 25 MPa, con relación nominal agua/cemento (a/c) de 0,56 y tamaño máximo del árido de 20 mm de origen calizo, el cual es el mismo que el utilizado para los estudios de hormigón hechos anteriormente en el **Capítulo 4**. El asentamiento esperado para este hormigón es de 10 cm.

Los materiales utilizados para la fabricación de estos hormigones y su caracterización se muestran en el **apartado 3.2 del Capítulo 3**.

La dosificación utilizada se muestra en la **tabla 4.1 (Capítulo 4)**, para unidades de kg/m^3 (peso) y para unidades de l/m^3 (volumen) así como sus correspondientes porcentajes en peso y en volumen de cada material utilizado. El contenido de agua en esta tabla corresponde al contenido total corregido de agua que considera el agua necesaria para el mezclado e hidratación (agua libre) y el agua de absorción de los áridos. Cabe mencionar que la humedad de los áridos era prácticamente nula o con valores de humedad despreciables por lo que no ha sido considerada para corregir este diseño.

7.3.6 Secuencia y procedimiento de amasado para la fabricación de hormigón

La secuencia de adición de materiales y el procedimiento de amasado del hormigón son los mismos que se explican en el **apartado 4.2.5 del Capítulo 4**.

7.3.7 Fabricación de las probetas de hormigón

El volumen de fabricación de hormigón de cada amasada fue de 35 litros, en función de la capacidad de la amasadora eléctrica utilizada (ver **apartado 4.2.6 del Capítulo 4**). De cada amasada se obtuvo la consistencia del hormigón fresco mediante el cono de Abrams [ASTM C143/C143M-00] y se elaboraron 4 probetas cilíndricas de 15 centímetros de diámetro por 30 centímetros de altura, [ASTM C192/C192M-00]. De las 4 probetas elaboradas se programaron 2 para ensayarlas a compresión simple a 7 días y 2 a 28 días [ASTM C39/C39M-01]. Además, para cada amasada se fabricaron 2 probetas cúbicas de 15 x 15 centímetros para ser ensayadas a 28 días.

Una vez finalizadas y enrasadas las probetas, se introdujeron las sondas termopares embebiéndolas aproximadamente a la mitad de la altura del cilindro. Posteriormente, las probetas fueron protegidas por medio de bolsas de plástico para minorizar la tasa de evaporación del agua del hormigón.

7.3.8 Ensayos de caracterización realizados

Como se mencionó anteriormente, la razón de ser de estos ensayos es la de verificar experimentalmente si el planteamiento hecho sobre la optimización del consumo de cemento en el hormigón es el correcto, por tal motivo los ensayos de caracterización realizados corresponden a los descritos en la norma [ASTM C192/C192M-00](#), para el caso de la determinación de la resistencia al hormigón a los 7 y 28 días. Dichos ensayos fueron realizados en las instalaciones de PROMSA, descritas en el [apartado 3.3](#) del [Capítulo 3](#).

7.4 RESULTADOS TÉRMICOS

Una vez descritos los procedimientos utilizados en el programa de trabajo, el presente apartado tiene por objeto mostrar los resultados obtenidos, analizando los mismos, en aras a verificar los planteamientos propuestos.

Los resultados que se presentan responden a cada uno de los hormigones fabricados cada hora durante el ciclo térmico utilizado. En este sentido se analizan las distribuciones térmicas obtenidas para los áridos y el hormigón, contrastándose en cada caso con las predicciones correspondientes.

A continuación se muestran los resultados correspondientes a los ciclos térmicos para cada hora de amasado, incluida la temperatura ambiental. El ciclo térmico programado corresponde al ciclo de temperaturas elevadas o condiciones de verano.

7.4.1 Temperatura ambiental

De la **tabla 3.5** del **Capítulo 3** podemos obtener los valores máximos y mínimos de temperatura en ese día así como las horas para los cuales se produjeron. De igual forma pueden calcularse los parámetros b_1 , b_2 , A y B, los cuales son necesarios para graficar la temperatura ambiental simulada. A continuación se muestra la **tabla 7.3** en donde se muestran dichos parámetros que servirán para la implementación numérica de los datos de temperatura.

Parámetros	Máxima	Mínima
Temperatura (°C)	36,50	21,80
Hora del día (hrs.)	12,50	23,50
b_1 (hrs)	18,00	
b_2 (hrs)	-11,00	
A (°C)	7,35	
B (°C)	29,15	

Tabla 7.3.- Parámetros para la simulación numérica (temperatura ambiente)

A continuación se muestra la **figura 7.5** en la cual se ha graficado la temperatura ambiental real registrada en la cámara y la simulación numérica de la temperatura ambiental de verano para un lapso de 24 horas.

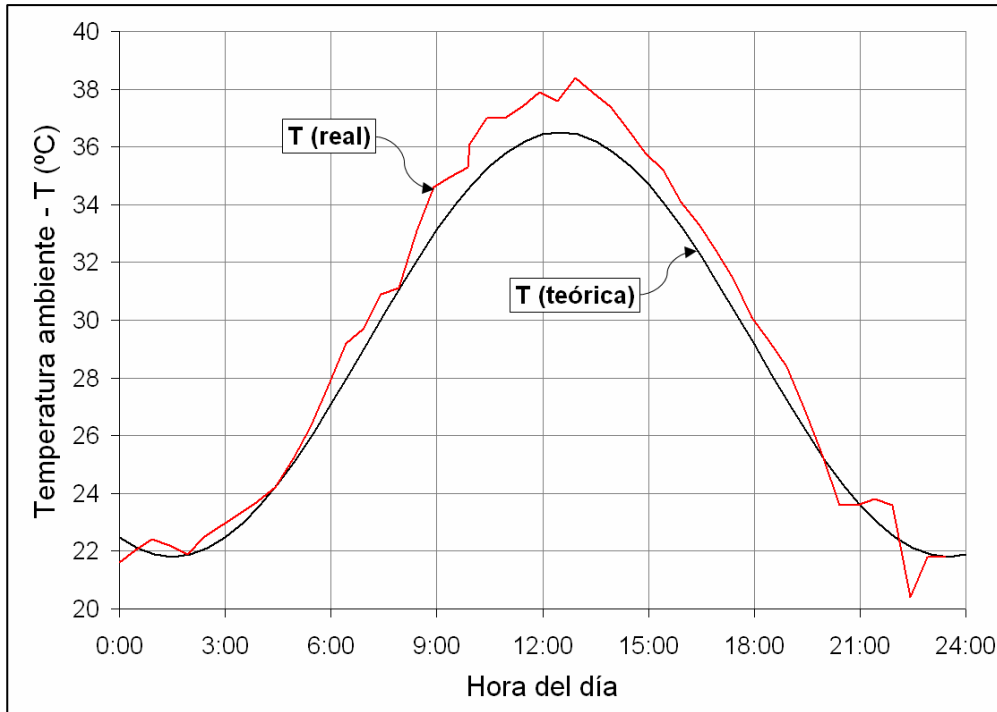


Figura 7.5.- Simulación numérica de la temperatura ambiental

Se observa en la figura anterior una buena correlación entre los datos reales y los datos numéricos utilizando la función descrita anteriormente, lo que indica que este tipo de ajuste es muy adecuado para los fines establecidos. Las pequeñas diferencias pueden responder a las distintas ubicaciones de los registros.

7.4.2 Temperatura de los áridos

En esta campaña se midió la temperatura de los áridos dentro de la cámara programada con el ciclo térmico de verano, por lo que es posible realizar una comparación con la predicción térmica de los áridos, en base a la formulación propuesta en el apartado 7.2.4. Esto se muestra a continuación en la figura 7.6, donde puede verse que hay una buena correlación entre ambas curvas.

Los valores tomados para las constantes involucradas en la formulación de esta determinación son los siguientes: $k_a=2,09$ kcal/hr·m²·°C; $S_a=1,18$ m²; $V_a=0,0907$ m³; $c_a=0,22$ kcal/kg·°C y $M_a=1980$ kg/m³. La temperatura ambiente era variable en cada determinación.

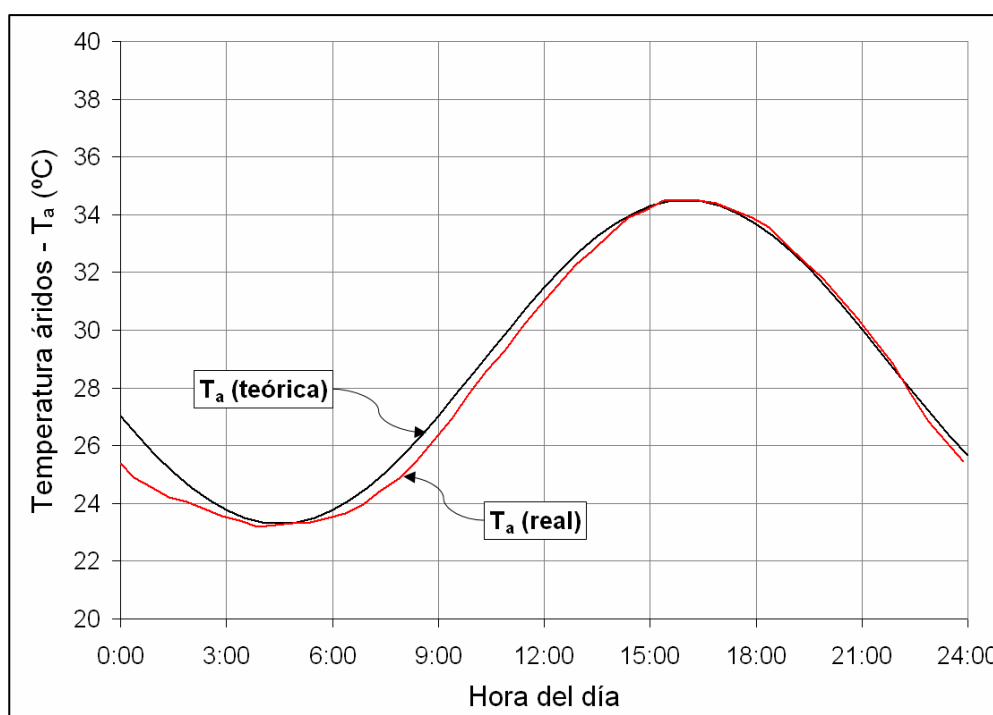


Figura 7.6.- Temperatura de los áridos (predicción vs real)

7.4.3 Temperatura inicial del hormigón

A continuación se muestra la **figura 7.7**, donde se presenta la temperatura inicial del hormigón (medida realmente en las probetas) y la temperatura inicial del hormigón (calculada mediante la fórmula dada en el **apartado 7.2.4**). Asimismo se incluye la curva correspondiente a la temperatura de los áridos (medida realmente). Cabe recordar que en este caso todos los demás materiales constituyentes del hormigón fueron depositados en la cámara 72 horas antes de realizar las amasadas, por lo que su temperatura era variable también.

Los valores tomados para las constantes involucradas en la formulación de esta determinación son los siguientes: $M_a=69,3 \text{ kg/m}^3$; $c_a=0,22 \text{ kcal/kg}\cdot^\circ\text{C}$; $M_{wa}=0 \text{ kg/m}^3$; $c_c=0,22 \text{ kcal/kg}\cdot^\circ\text{C}$.

La temperatura del cemento y del agua (T_c y T_w) en este caso eran variables, ya que los materiales se encontraban dentro de la cámara climática. Sin embargo en condiciones de producción real la temperatura del cemento suele estar entre 60 y 70 °C y la del agua dependerá de la red de abastecimiento. Asimismo la cantidad de cemento y de agua (M_c y M_w) variaban en función de la hora de fabricación, ya que los contenidos de cemento y agua estaban especificados de acuerdo a la tabla de sobreconsumos (**apartado 7.3.4**).

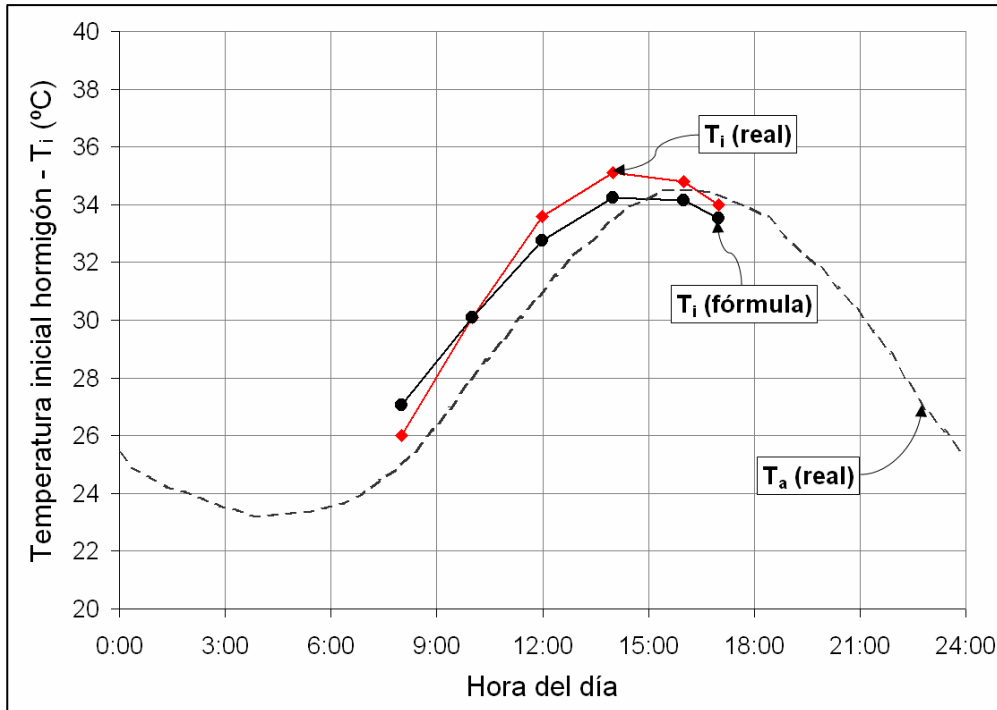


Figura 7.7.- Temperatura inicial del hormigón (T_i) (calculada vs real)

En la figura anterior puede verse que la variación entre los valores obtenidos realmente y los obtenidos mediante la fórmula es mínima, asimismo que la temperatura del hormigón es ligeramente mayor a la de los áridos, con una tendencia paralela a ésta.

7.4.4 Temperatura desarrollada por el hormigón (calor de hidratación cemento)

A continuación se muestran los diferentes perfiles térmicos desarrollados por el hormigón calculados en función del planteamiento desarrollado en el apartado 7.2.5 de este mismo capítulo.

Desarrollo de temperatura en condiciones adiabáticas

A continuación, la figura 7.8 muestra la curva de incremento de temperatura adiabática, extrapolada para el hormigón bajo estudio en base a los resultados de calor de hidratación para el cemento CEM I 42,5 R, obtenidos mediante la norma UNE 80-118-86, en base a las fórmulas indicadas en el apartado 7.2.5.

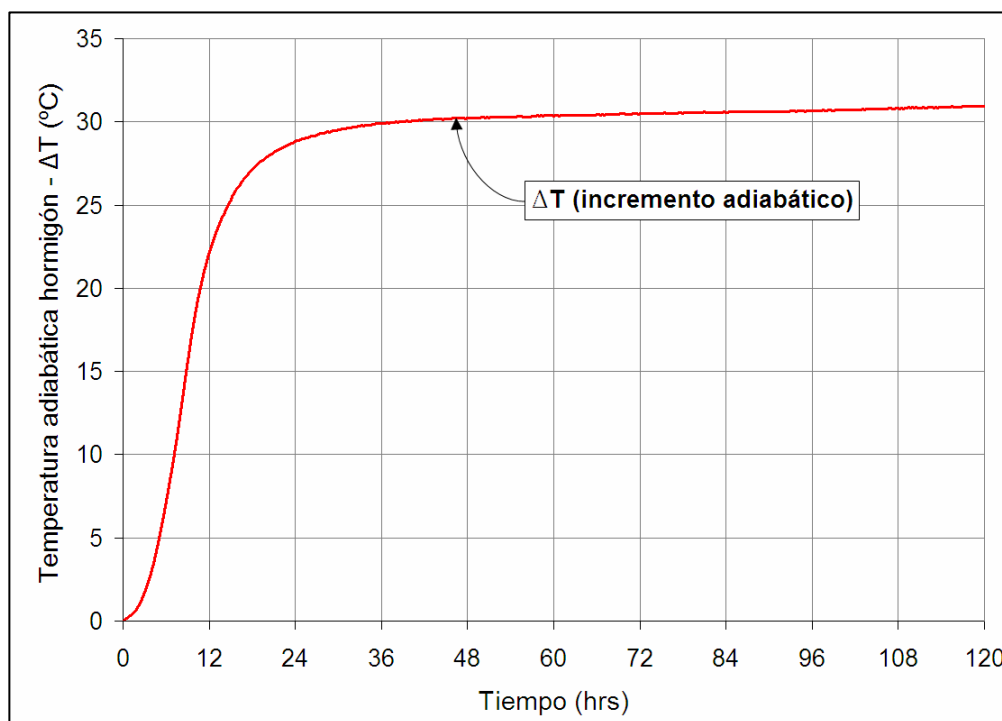


Figura 7.8.- Incremento de temperatura adiabática del hormigón (ΔT)

Transferencia de temperatura al ambiente por el hormigón

Una vez obtenido el perfil correspondiente al incremento de temperatura del hormigón en condiciones adiabáticas, habría que determinar la transferencia de temperatura al ambiente, con el objeto de conocer el incremento de temperatura del hormigón bajo condiciones no adiabáticas e isotérmicas.

Lo anterior puede hacerse mediante la ecuación de calor de hidratación (q) detallada en la norma [UNE 80-118-86](#), ya que se conoce el calor de hidratación y el calor acumulado en el calorímetro. Así pues, despejando el segundo término de esta ecuación de calor de hidratación se puede conocer la transferencia de calor al ambiente por el cemento. De igual forma que en el apartado anterior, esta transferencia medida en (J/g ó cal/g) puede ser extrapolada a unidades de temperatura ($^{\circ}$ C) para el hormigón.

La **figura 7.9** muestra la curva de transferencia de temperatura al ambiente por parte del hormigón.

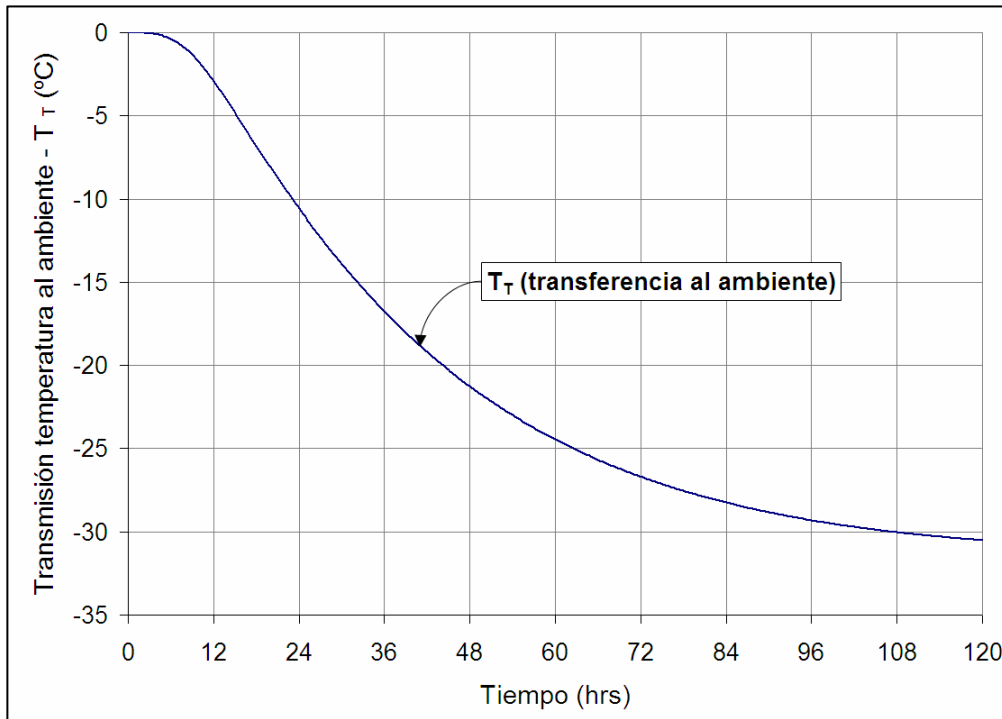


Figura 7.9.- Transferencia de temperatura al ambiente por el hormigón (T_T)

Desarrollo de temperatura en condiciones no adiabáticas

En base a las dos curvas térmicas presentadas anteriormente (**figuras 7.6 y 7.7**), es posible conocer el desarrollo de temperatura del hormigón bajo condiciones no adiabáticas pero isotérmicas, mediante la suma algebraica del incremento de temperatura adiabática y la transferencia de temperatura al ambiente. Lo anterior se muestra gráficamente en la **figura 7.10**.

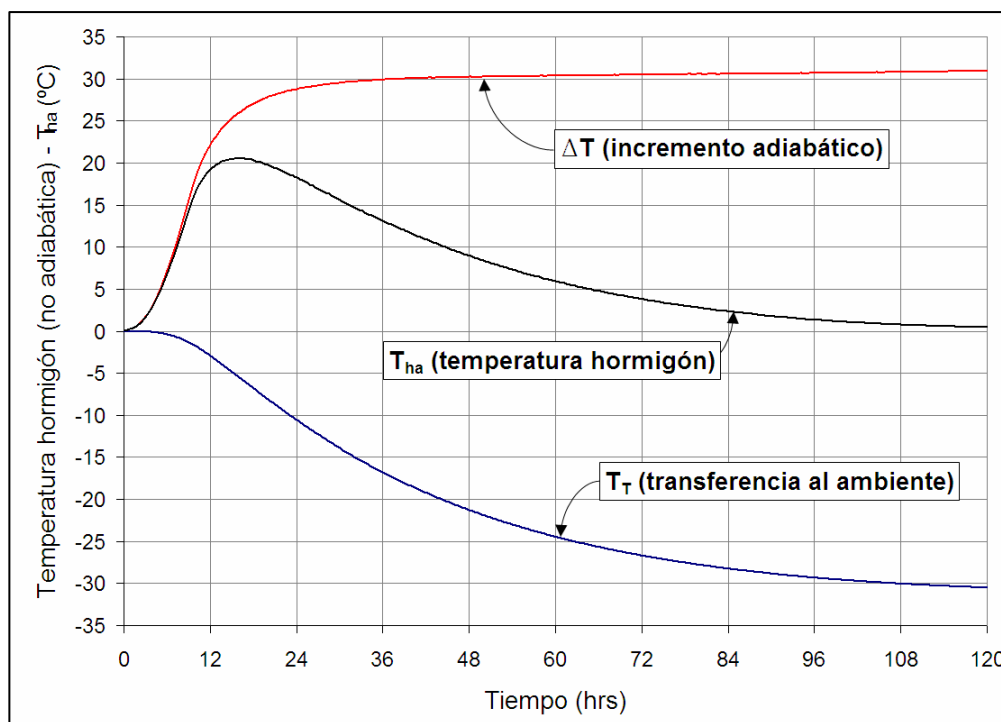


Figura 7.10.- Temperatura del hormigón en condiciones no adiabáticas (T_{ha})

7.4.5 Temperatura desarrollada por el hormigón en condiciones no adiabáticas y no isotérmicas

En base a la función desarrollada al final del [apartado 7.2.5](#), es posible conocer la temperatura de la masa del hormigón (T_h) para condiciones no adiabáticas y no isotérmicas.

En este caso se hicieron dichas determinaciones en base a los datos de partida correspondientes a la dosificación del hormigón, a los materiales utilizados y a las propiedades geométricas de los cilindros de control, con el objeto de poder comparar las predicciones térmicas con los datos medidos experimentalmente. Los valores tomados para las constantes involucradas en la formulación de esta determinación son los siguientes: $k_h=2,75$ kcal/hr·m²·°C; $S_h=0,1767$ m² y $V_h=0,0053$ m³. Los demás valores incluidos en la fórmula son variables.

A continuación se muestran las [figuras 7.11, 7.12, 7.13, 7.14, 7.15 y 7.16](#) en las cuales se graficaron los perfiles térmicos reales y de predicción de los hormigones fabricados a las 8:00 horas, 10:00 horas, 12:00 horas, 14:00 horas, 16:00 horas y 17:00 horas, respectivamente.

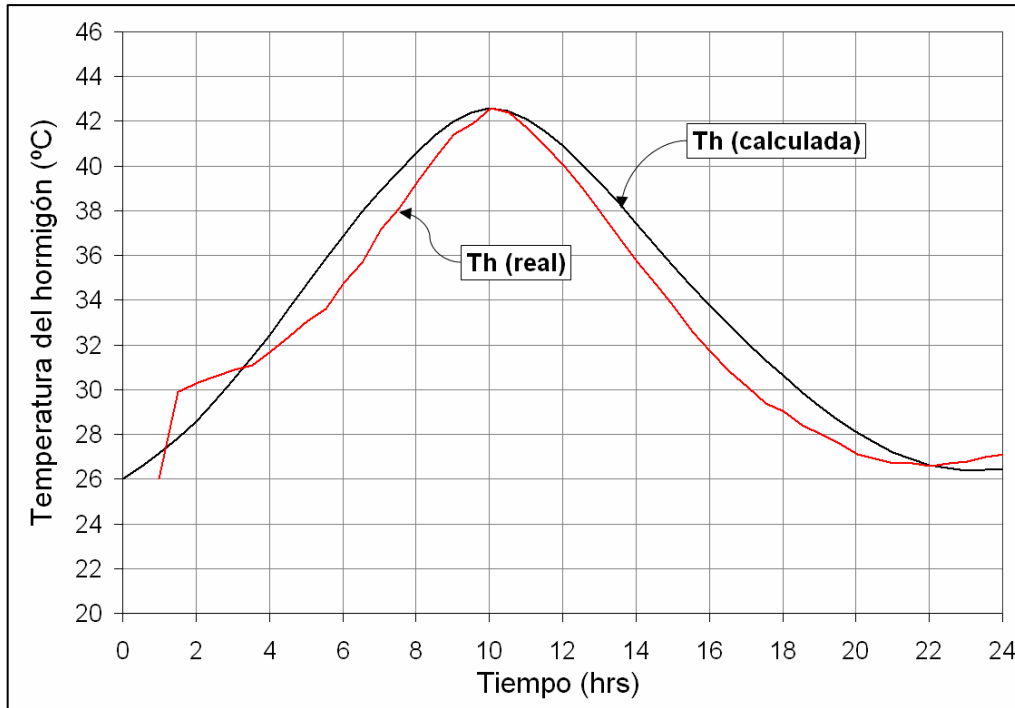


Figura 7.11.- Perfil térmico del hormigón fabricado a las 8:00 hrs (predicción vs real)

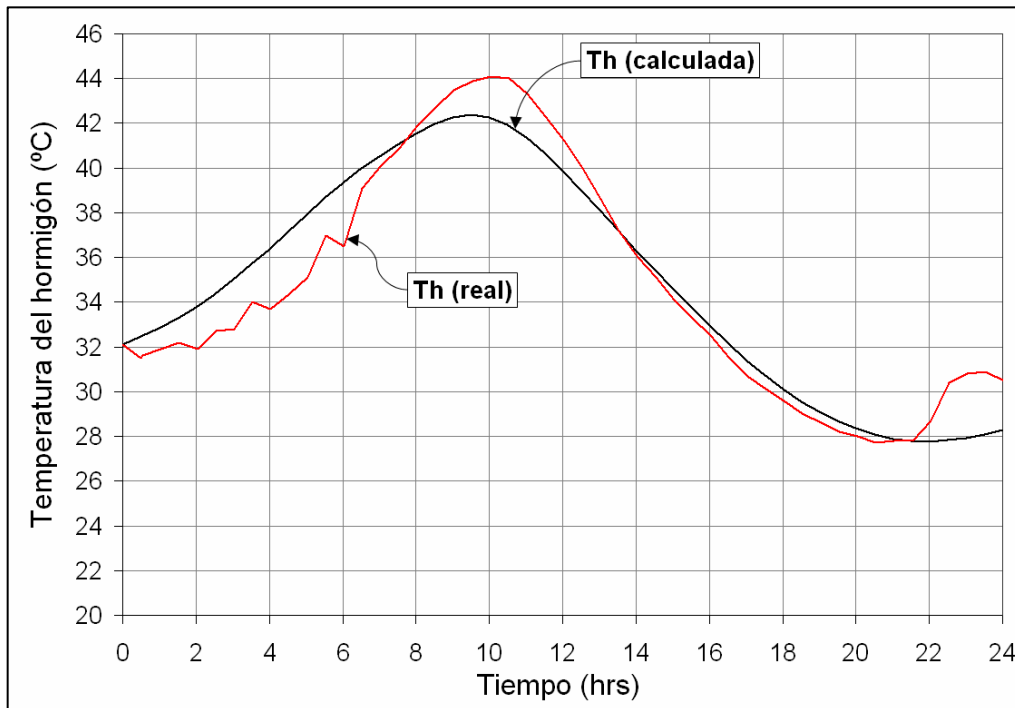


Figura 7.12.- Perfil térmico del hormigón fabricado a las 10:00 hrs (predicción vs real)

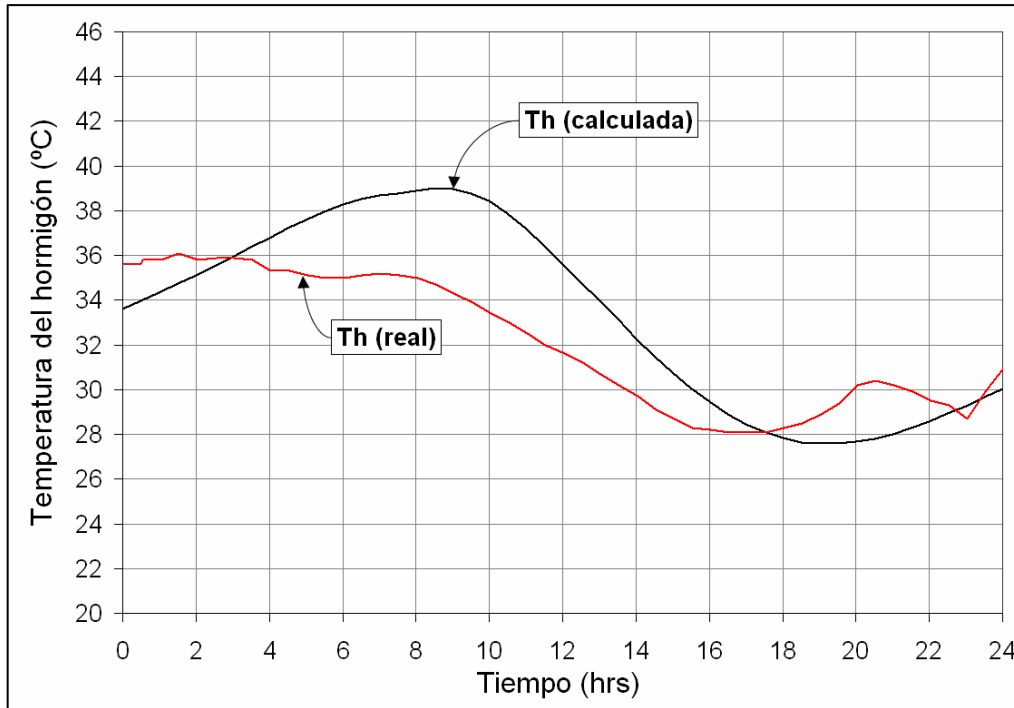


Figura 7.13.- Perfil térmico del hormigón fabricado a las 12:00 hrs (predicción vs real)

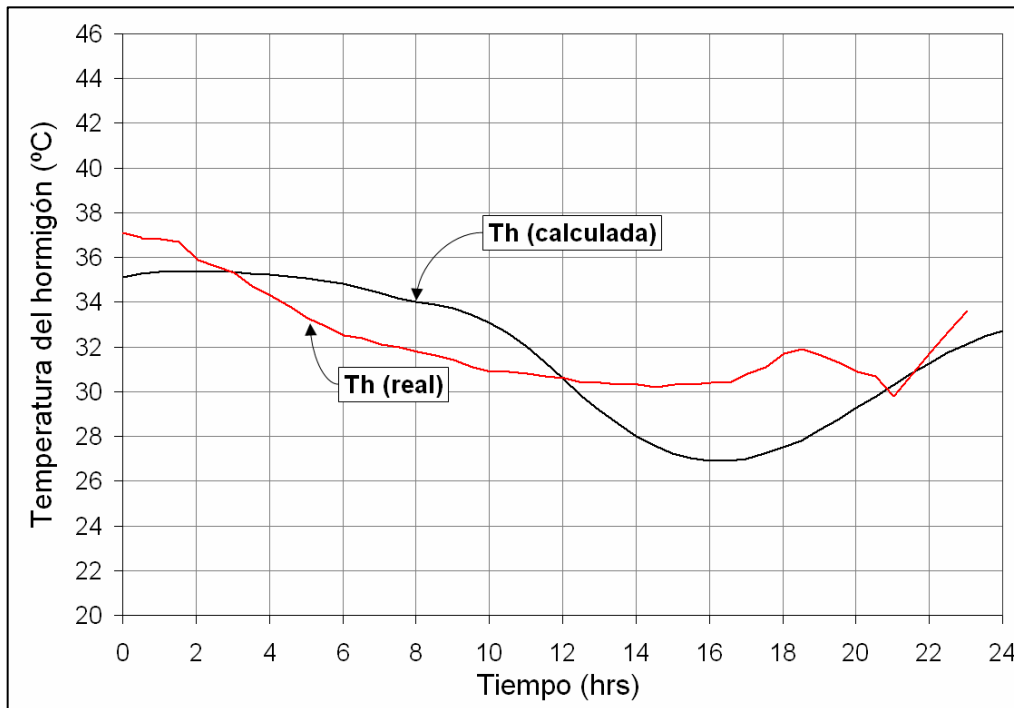


Figura 7.14.- Perfil térmico del hormigón fabricado a las 14:00 hrs (predicción vs real)

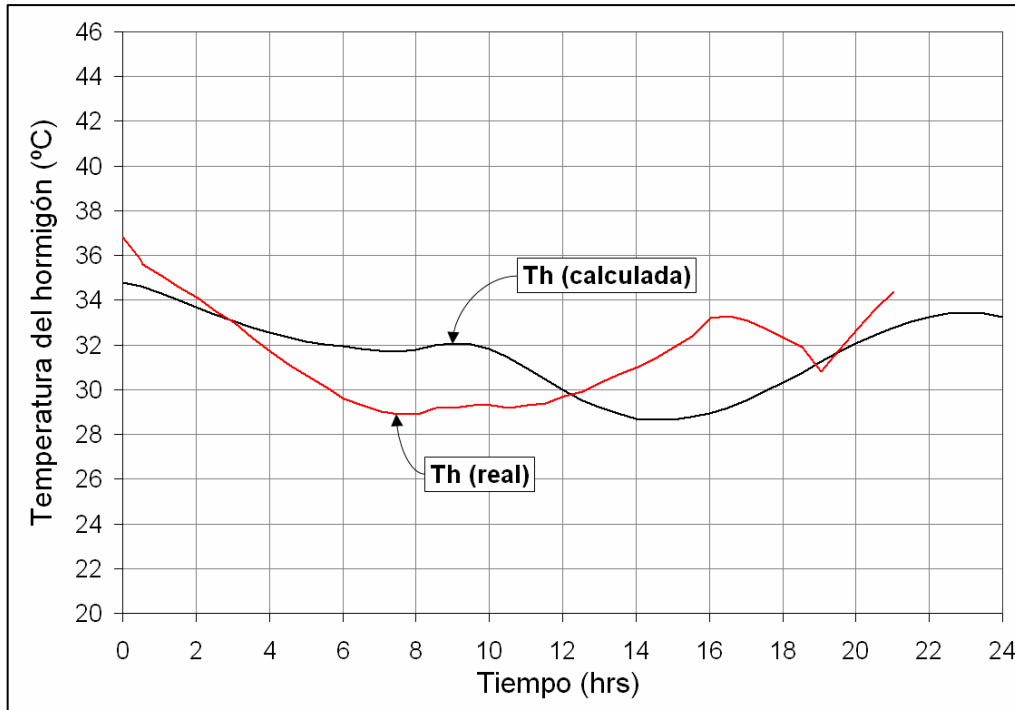


Figura 7.15.- Perfil térmico del hormigón fabricado a las 16:00 hrs (predicción vs real)

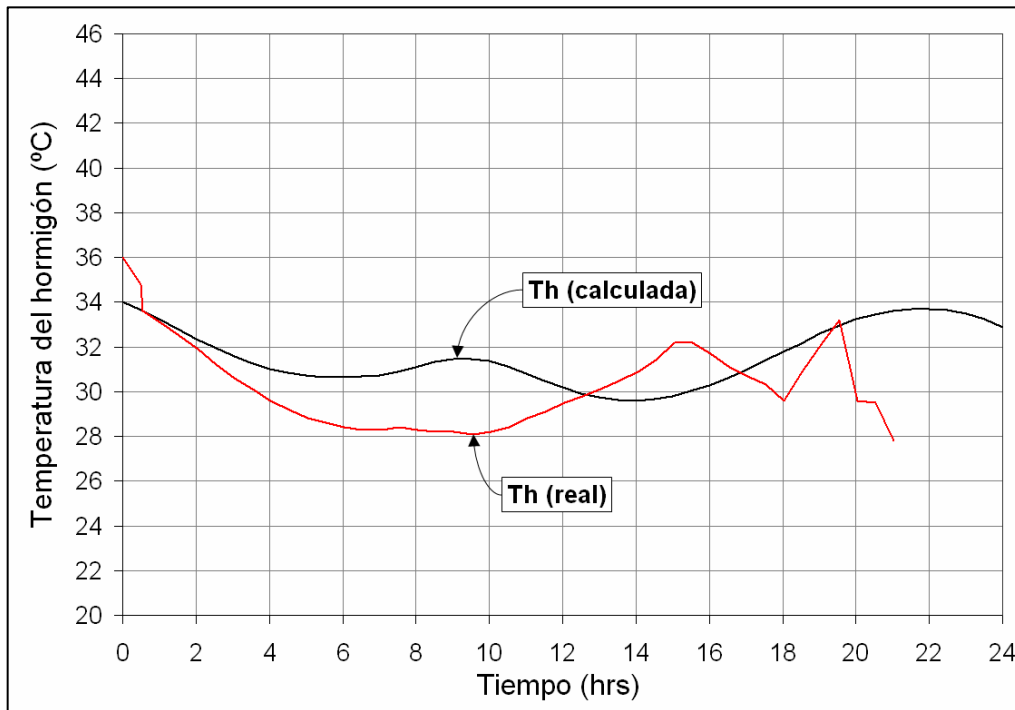


Figura 7.16.- Perfil térmico del hormigón fabricado a las 17:00 hrs (predicción vs real)

Puede verse en las figuras anteriores, en general un ajuste aceptable entre los perfiles térmicos calculados o de predicción y los perfiles térmicos reales medidos mediante sondas termopares. Sin embargo es necesario afinar el modelo calibrándolo con resultados adicionales medidos experimentalmente, sobre todo en la parte correspondiente a la transferencia térmica al ambiente.

Por otro lado, en el caso del hormigón fabricado a las 12:00 horas, no existe una buena concordancia entre lo calculado y lo registrado experimentalmente, en este caso parece ser que en la sonda termopar o en el canal del squirrel utilizados en este caso hubo algún fallo. Lo anterior es más fácil de visualizar si se grafican todos los perfiles térmicos reales conjuntamente, esto se muestra a continuación en la **figura 7.17**.

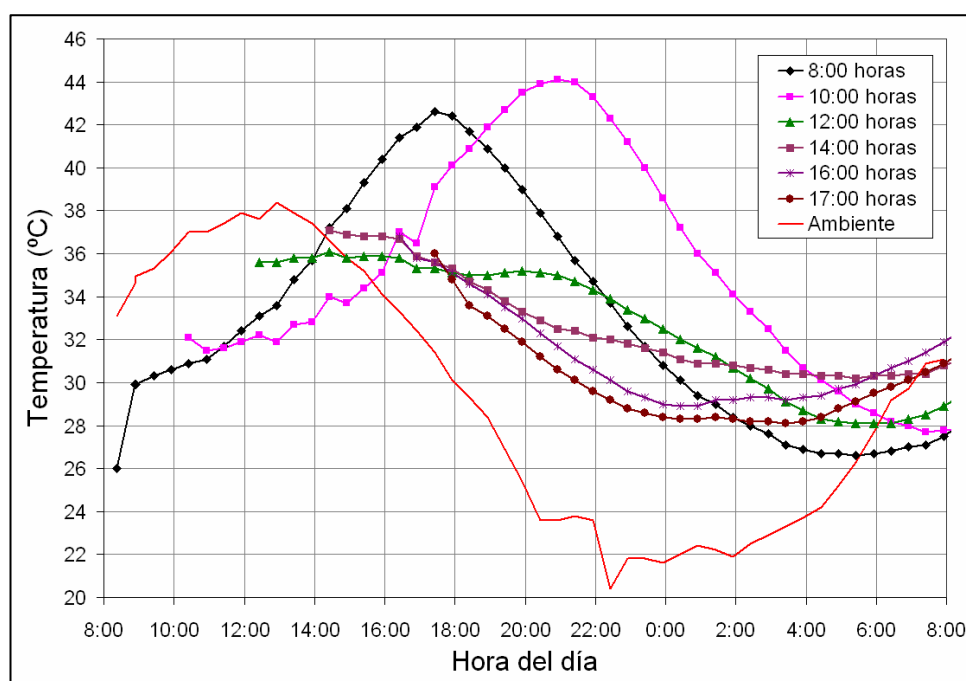


Figura 7.17.- Perfiles térmicos reales para todas las horas de fabricación

Si se comparan estos perfiles térmicos con los obtenidos en la campaña inicial de ensayos con hormigón bajo condiciones de verano (**apartado 4.3.2, Capítulo 4**), puede verse que el hormigón fabricado alrededor de las 12:00 horas, tiene un perfil térmico con una cresta mayor, lo cual respalda lo afirmado anteriormente.

7.5 RESULTADOS DE CONSISTENCIA

A continuación se muestran en la **tabla 7.4** los resultados obtenidos correspondientes a la consistencia o trabajabilidad de cada hormigón, medida a través del cono de Abrams.

Cabe mencionar que en la amasada correspondiente a las 17:00 horas ocurrió un problema durante el amasado, en el cual el árido fino y el cemento se pegaron en la parte inferior de la amasadora formando una “costra” y causando que la consistencia y cohesión del hormigón fuesen muy bajas, la textura de este hormigón era muy “gruesa” y poco manejable. Es muy probable que este incidente tenga repercusiones sobre los valores de asentamiento y resistencia a compresión.

Hora de fabricación	Asentamiento (cm)
8:00	4
10:00	5
12:00	7
14:00	7
16:00	7
17:00	4*

Tabla 7.4.- Valores de asentamiento del hormigón

Se observa en la tabla anterior que los valores comprendidos entre las 12:00 y las 16:00 horas conducen a valores más altos de asentamiento, tomando en consideración el fallo ocurrido en la última amasada, es probable que el asentamiento en esta amasada no fuese tan bajo.

El hecho de que la trabajabilidad del hormigón se vea reducida por la temperatura de la masa fresca del hormigón en los primeros instantes es un fenómeno recurrente y bien conocido. Lo anterior es debido a una rápida absorción de agua por parte de los áridos, así como a una mayor evaporación de ésta por el incremento en la temperatura del hormigón.

7.6 RESULTADOS DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN

En este apartado se presentan y analizan los resultados correspondientes a la resistencia a compresión del hormigón a 7 y 28 días. Conviene recordar que para estas determinaciones se han elaborado 4 probetas cilíndricas estándar, de las cuales 2 se han ensayado a los 7 días y 2 a los 28 días. Asimismo se fabricaron para cada amasada 2 probetas cúbicas para ser ensayadas a 28 días.

7.6.1 Resistencia a compresión a los 7 días

La **tabla 7.5** muestra las resistencias obtenidas para el hormigón a la edad de 7 días. En ella se muestran los resultados correspondientes a cada probeta en las diferentes horas de fabricación. Asimismo, se dan los valores medios, la desviación estándar y el coeficiente de variación.

Resistencia a compresión, 7 días (MPa)													
Parámetro estadístico	Hora de fabricación												
	8:00		10:00		12:00		14:00		16:00		17:00		Global
Probeta 1,2	31,6	31,8	32,9	35,0	33,0	33,9	35,5	34,1	35,4	36,3	34,6	34,9	---
Media	31,7		34,0		33,5		34,8		35,9		34,8		34,1
Desviación estándar	0,141		1,485		0,636		0,990		0,636		0,212		1,427
C.V.	0,4%		4,4%		1,9%		2,8%		1,8%		0,6%		4,2%

Tabla 7.5.- Resistencia a compresión del hormigón (MPa), 7 días

7.6.2 Resistencia a compresión a los 28 días

Las **tablas 7.6** y **7.7** muestran las resistencias obtenidas a la edad de 28 días para las probetas cilíndricas y para las probetas cúbicas, respectivamente, de los hormigones bajo estudio. En ellas se muestran los resultados correspondientes a cada probeta en las diferentes horas de fabricación. Asimismo, se dan los valores medios, la desviación estándar y el coeficiente de variación.

Resistencia a compresión, 28 días (MPa)													
Parámetro estadístico	Hora de fabricación												
	8:00		10:00		12:00		14:00		16:00		17:00		Global
Probeta 1,2	44,5	44,3	46,5	46,5	48,2	46,4	48,8	47,4	50,0	49,6	45,3	47,9	---
Media	44,4		46,5		47,3		48,1		49,8		46,6		47,1
Desviación estándar	0,141		0,000		1,273		0,990		0,283		1,838		1,802
C.V.	0,3%		0,0%		2,7%		2,1%		0,6%		3,9%		3,8%

Tabla 7.6.- Resistencia a compresión del hormigón (MPa), 28 días

Resistencia a compresión, 28 días (MPa) -probetas cúbicas-													
Parámetro estadístico	Hora de fabricación												
	8:00		10:00		12:00		14:00		16:00		17:00		Global
Probeta 1,2	48,1	48,6	49,8	49,6	53,3	51,1	49,4	51,7	55,6	53,6	51,2	50,1	---
Media	48,4		49,7		52,2		50,6		54,6		50,7		51,0
Desviación estándar	0,354		0,141		1,556		1,626		1,414		0,778		2,165
C.V.	0,7%		0,3%		3,0%		3,2%		2,6%		1,5%		4,2%

Tabla 7.7.- Resistencia a compresión del hormigón (MPa), 28 días (probetas cúbicas)

En primer lugar puede señalarse, que los coeficientes de variación obtenidos son pequeños y, consecuentemente, asumible la fiabilidad de los resultados. En este caso la variación propia de todos los resultados es de un 4% aproximadamente, lo que indica que la dispersión entre cada hora de fabricación es muy pequeña, lo cual responde a lo esperado acorde con el planteamiento de la propuesta. Recordemos que los consumos de cemento, agua y aditivo son diferentes en cada hora de fabricación, con el objeto de tener la misma resistencia a lo largo del día; la relación agua/cemento es siempre constante.

En cuanto a los resultados de resistencia obtenidos para las probetas cúbicas, los valores presentan la misma tendencia observada en relación a los resultados obtenidos con las probetas cilíndricas, pero con una resistencia mayor debido al factor de forma del espécimen. En general la resistencia a compresión a 28 días obtenida para las probetas cúbicas, presenta una relación de 1.1 respecto a la obtenida para las probetas cilíndricas, lo cual está en línea con lo especificado en algunas normativas, como por ejemplo la [\[ISO Standard 3893-1977 \(E\)\]](#), la cual da un valor de relación de 1.10 y 1.11 para hormigones cuya resistencia esté comprendida entre 45-50 y 50-55 MPa, respectivamente. Asimismo, se presenta la siguiente relación dada por [\[Day, 1995\]](#):

$$R_{\text{cubo}} = R_{\text{cilindro}} + \frac{19}{\sqrt{R_{\text{cilindro}}}}$$

Substituyendo en la fórmula anterior los valores de resistencia obtenidos en los cilindros, los valores obtenidos de resistencia en cubos tienen una relación de aproximadamente 1.10 respecto a los obtenidos en cilindros, para todas las horas de fabricación.

A continuación se muestra la **figura 7.18**, donde se presentan de forma gráfica los resultados de resistencia a compresión para cada hora de fabricación. Asimismo se presentan los valores de sobreconsumo de cemento adicionados en función de cada hora de fabricación. En este caso se consideró la resistencia de las 17:00 horas como el punto de referencia, ya que en este caso la sobredosificación de cemento fue nula.

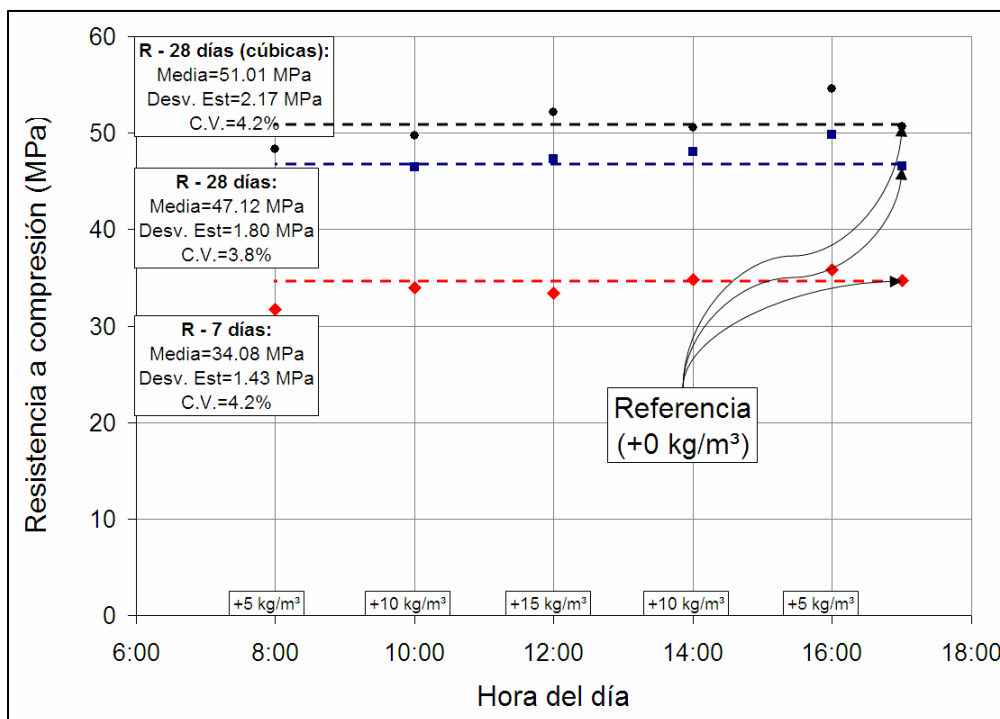


Figura 7.18.- Resultados de resistencia a compresión (7 y 28 días)

En la figura anterior puede verse que la variación de resistencia en función de la hora de fabricación es prácticamente nula, habiendo solo pequeñas variaciones que son consecuencia de la precisión propia de los métodos de ensayo.

Lo anterior significa que la política escalonada de sobredosificación propuesta es la adecuada, si bien habrá que esperar a los resultados de control de calidad obtenidos sobre la producción real.

7.7 TABLA DE VALORES DE SOBRESOBRECONSUMO DE CEMENTO

Una vez planteadas las bases metodológicas y verificada experimentalmente su viabilidad, es posible determinar el perfil térmico que tendrá un hormigón bajo diferentes circunstancias (dosificación, contenido y tipo de cemento, condiciones ambientales, etc.).

En base a la temperatura máxima que pueda alcanzar un hormigón y a la variación térmica (diferencia entre la temperatura máxima y la temperatura inicial), en función de las temperaturas ambientales de un día dado, de la hora en que sea fabricado y de la dosificación, contenido y tipo de cemento, se formuló una tabla de sobreconsumos de cemento en el hormigón.

Los datos de partida para tal formulación fueron una combinación entre los resultados obtenidos mediante el planteamiento teórico-térmico presentado y las experiencias aprendidas a lo largo de los trabajos incluidos en el convenio. En este sentido se analizaron numéricamente todas las posibles combinaciones en función de la temperatura ambiental y la hora del día, teniendo como restricción que las sobredosificaciones se harían para temperaturas mayores a 21 °C a las 7 horas y que antes de las 7:00 horas y a partir de las 17:00 horas no habría sobredosificación de cemento. Asimismo, los intervalos de temperatura ambiental a las 7:00 horas fueron ajustados de tal forma que los consumos de cemento fueran múltiplos de 5 kg/m³, con el objeto de facilitar la implementación manual en la producción, cuando este sea el caso.

A continuación, se muestra la **tabla 7.8**, la cual muestra los sobreconsumos de cemento propuestos en base al planteamiento teórico mostrado en este capítulo, para hormigones fabricados con cemento CEM I 42,5 R.

Sobredosificación de cemento (kg/m ³)								
Temperatura ambiental (° C)		0:00 a 7:00 horas	7:00 a 9:00 horas	9:00 a 11:00 horas	11:00 a 14:00 horas	14:00 a 16:00 horas	16:00 a 17:00 horas	17:00 a 24:00 horas
7:00 horas	Máxima							
< 21	31,9	0	0	0	0	0	0	0
21 - 23	33,9	0	0	0	5	0	0	0
23 - 27	33,3	0	0	5	10	5	0	0
27 - 30	39,5	0	5	10	15	10	5	0
> 30	40,1	5	10	15	20	15	10	5

Tabla 7.8.- Tabla de sobreconsumos de cemento (CEM I 42,5 R)

Notas:

1. valores de temperatura ambiental máxima obtenidos mediante distribución estadística (t-student) de los meses de junio, julio y agosto del período de años comprendido entre 1997 y 2004 (8 años).
2. valores de temperatura obtenidos del observatorio meteorológico Fabra.
3. temperaturas mayores a 30 °C a las 7:00 horas solo se registraron en 4 días dentro del período de 8 años.
4. el intervalo de 27 - 30 °C a las 7:00 hrs es el que corresponde con el estudiado experimentalmente.
5. estos sobreconsumos están calculados para el cemento CEM I 42,5 R, tomando como referencia un hormigón de 25 MPa con relación A/C = 0,56 (C=292 kg/m³; A=165 l/m³)

7.8 CONCLUSIONES

Las principales conclusiones derivadas de las consideraciones expuestas y de los trabajos realizados en este capítulo, son las siguientes:

- Existe una buena concordancia entre las predicciones realizadas por medio del modelo numérico desarrollado (temperatura ambiente, temperatura de los áridos y temperatura del hormigón) y los registros obtenidos experimentalmente por sensores térmicos, lo cual valida el buen funcionamiento térmico del planteamiento.
- La propuesta metodológica planteada en este capítulo es de fácil programación e implementación a nivel industrial.
- La existencia de las altas temperaturas en los áridos incide en una mayor absorción de los mismos que se refleja en una disminución de la trabajabilidad, como se observa anteriormente en los **Capítulos 4, 5 y 6**. Las diferentes horas del día en las que se hormigona, no tienen una influencia clara en esta dirección, fruto de la inercia térmica de los propios áridos.
- Las resistencias obtenidas en ambas edades, muestran una tendencia plana y sin variaciones significativas, lo cual era el objetivo de esta campaña experimental y que confirma que la política de una sobredosificación escalonada funciona correctamente a nivel industrial.
- Las resistencias alcanzadas están por encima de las previstas para el tipo de hormigón utilizado, si bien acordes con las diferencias de producción en laboratorio y a escala industrial.
- Es necesario evaluar los resultados de resistencia a compresión sobre la producción de hormigón preparado a nivel industrial con el objeto de verificar si la política propuesta de toma de decisiones funciona completamente o si es preciso realizar algún ajuste.
- Finalmente, es preciso realizar un análisis estadístico con los valores de resistencia a compresión para calibrar en su caso, los sobreconsumos de cemento propuestos.