

Capítulo

4

**Ensayos con
hormigón**

4.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se describe la metodología seguida para la realización de los ensayos correspondientes a la serie experimental con hormigón, asimismo se muestran y analizan los resultados obtenidos.

En primer lugar se menciona la información básica sobre las variables de estudio y el diseño de la mezcla, secuencia de adición de materiales y ensayos de caracterización realizados. Principalmente se muestra la metodología seguida para la realización de los ensayos con el objeto de hacer posible su reproducibilidad en todos los sentidos.

Posteriormente se presentan los resultados obtenidos correspondientes a la simulación de las condiciones de verano y de invierno; la presentación y análisis de los resultados corresponde a dos categorías principalmente: los resultados térmicos y los resultados mecánicos. Primeramente se muestran los resultados en base al comportamiento térmico del hormigón en estado fresco durante las primeras horas (24, 48 y 72 horas) de fabricación y el comportamiento en base a las características de trabajabilidad o consistencia. Después se presentan los resultados mecánicos correspondientes a la resistencia a compresión a 7 y 28 días .

En todos los casos se hacen análisis comparativos entre las dos condiciones climáticas estudiadas (verano e invierno), la edad de desmoldeo y la hora de fabricación, posteriormente se realizará un análisis comparativo entre los resultados obtenidos para las condiciones de verano y los obtenidos para las condiciones de invierno. Asimismo se correlacionan los resultados térmicos y mecánicos.

Posteriormente, se realiza una discusión sobre cierta información investigada en la literatura y su concordancia con los resultados obtenidos en esta serie experimental de laboratorio. Asimismo, se presentan las principales conclusiones correspondientes a los comportamientos y tendencias observadas.

Finalmente, se resalta la importancia de dichas tendencias de comportamiento, en el sentido de las potenciales aplicaciones a nivel industrial que son viables de implementación, con el objeto de optimizar la dosificación de cemento en el hormigón en condiciones de verano y como punto de partida principal para desarrollar una propuesta metodológica de optimización.

4.2 PLAN DE TRABAJO

4.2.1 Introducción y objetivos

En este capítulo se estudia la influencia de la temperatura y la edad de desmoldeo en la resistencia a compresión del hormigón bajo condiciones climáticas cíclicas variables (verano e invierno) y bajo una condición de referencia. Asimismo se pretende conocer la influencia de la hora de hormigonado a lo largo del día en las características del hormigón tanto en estado fresco como en estado endurecido.

4.2.2 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 la **figura 4.1** 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**.

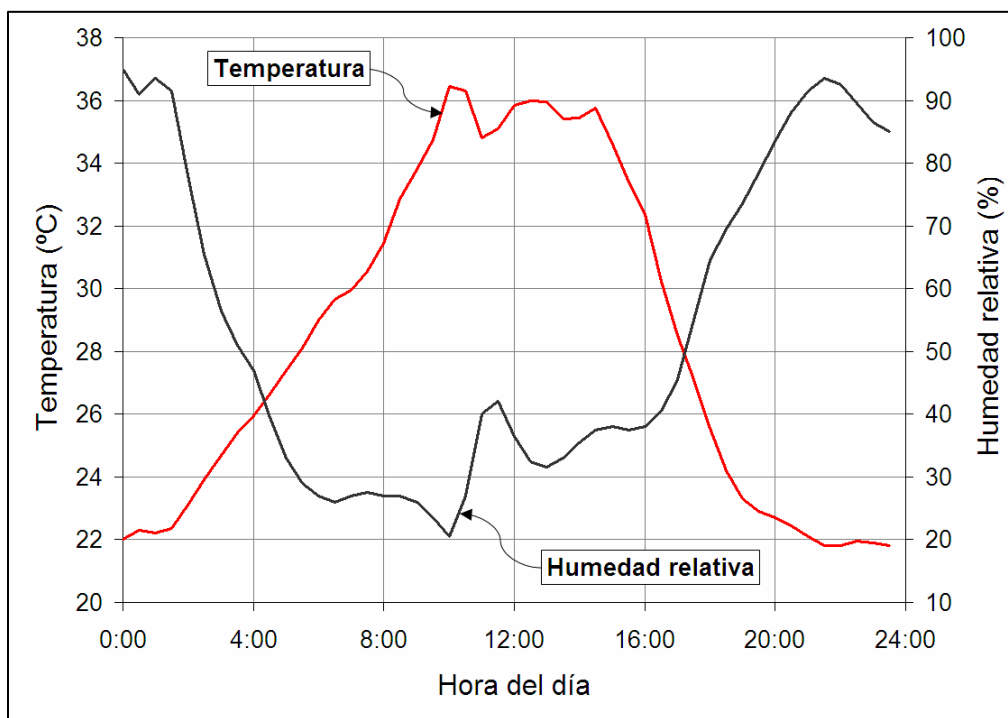


Figura 4.1.- Temperatura y humedad relativa programadas

4.2.3 Variables estudiadas y procedimiento experimental

Como parte del estudio de la influencia que tienen las condiciones ambientales sobre las propiedades del hormigón, se determinó la edad de desmoldeo de las probetas de control de hormigón con una de las variables a estudiar. Lo anterior debido a que en la práctica (en las obras) algunas veces no se cumple la especificación de desmoldar las probetas de hormigón a las 24 horas después de fabricarse. Con base a ello se plantearon tres edades de desmoldeo: 24 horas, 48 horas y 72 horas.

Por otro lado, en aras a analizar la influencia de la hora de hormigonado, en cada edad de desmoldeo y para cada condición térmica, se realizaron cinco amasadas de hormigón a diferente hora del día (hora de fabricación). Para el caso de la simulación de las condiciones de verano, las horas de fabricación del hormigón fueron las 10:00 horas, 11:30 horas, 13:00 horas, 14:30 horas y 17:30 horas y para el caso de la simulación de las condiciones de invierno las horas de fabricación fueron las 8:15 horas, 10:00 horas, 12:00 horas, 14:00 horas y 17:00 horas. Asimismo se realizó una serie control, la cual fue tomada como referencia y sobre la cual las condiciones térmicas a las que fue sometida fueron 20 °C de temperatura y 95% aproximadamente de humedad relativa, ambas condiciones fueron constantes a lo largo del tiempo.

4.2.4 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 asentamiento esperado para este hormigón es de 10 cm. La dosificación utilizada se muestra en la [tabla 4.1](#), para unidades de kg/m³ (peso) y para unidades de l/m³ (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.

Material	Dosificación (kg/m ³)	Porcentaje (peso)	Densidad (gr/cm ³)	Dosificación (l/m ³)	Porcentaje (volumen)
Cemento	292	12,0%	3,15	93	9,2%
Agua	165	6,8%	1,00	165	16,4%
Grava 12-20	830	34,0%	2,72	305	30,3%
Gravilla 5-12	85	3,5%	2,67	32	3,2%
Arena 0-5	860	35,3%	2,60	331	32,8%
Arena 0-2	205	8,4%	2,57	80	7,9%
Aditivo	2,04	0,1%	1,18	2	0,2%
Total	2.439	100,0%		1.007	100,0%

Tabla 4.1.- Dosificación utilizada para la fabricación del hormigón

Podemos ver en la tabla anterior que para la dosificación por peso, la cantidad de áridos representa el 81,2 % del peso total del hormigón, mientras que para la dosificación por volumen, los áridos ocupan un volumen total del 74,2 % del hormigón. Por otro lado, es interesante observar que el agua representa en peso solo un 6,8 % del hormigón, mientras que en volumen representa un 16,4 %.

Por otro lado, cabe mencionar que este diseño de hormigón es el utilizado industrialmente en condiciones climáticas estándar, es decir, en las estaciones de primavera y otoño en donde las condiciones climatológicas no tienen tantos efectos adversos sobre las propiedades del hormigón. Para el caso del hormigonado en condiciones de verano e invierno, se realiza una corrección en la dosificación de cemento y de aditivo para contrarrestar dichos efectos negativos. En estos ensayos se mantuvo siempre la misma dosificación con el objeto de observar las variaciones existentes entre el hormigón control o de referencia y ambas condiciones climáticas así como la variación resultante entre las dos condiciones climáticas de verano e invierno.

Finalmente, se presenta en la **figura 4.2** la gráfica correspondiente a las proporciones utilizadas en la dosificación del hormigón bajo estudio en peso y en volumen sobre 1 metro cúbico. Los materiales utilizados y su caracterización se muestran en el **Capítulo 3** de esta tesis. De igual forma, en el **Anejo A** se puede consultar gráficamente la distribución granulométrica de la mezcla de áridos a través de los diferentes tamaños de tamices, asimismo ésta mezcla de áridos es comparada con la distribución de Fuller.

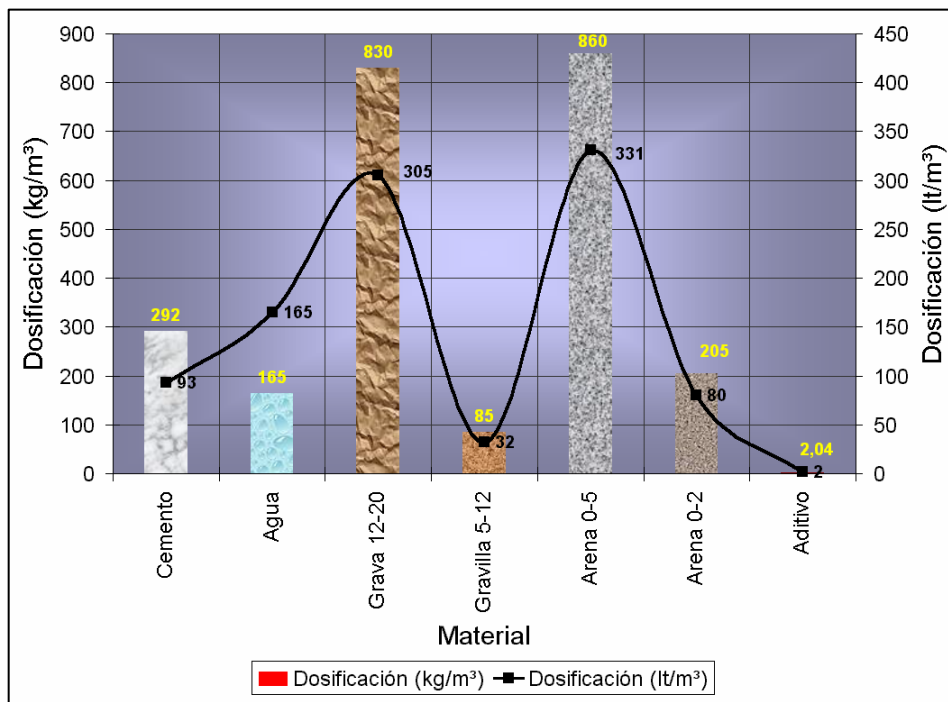


Figura 4.2.- Representación gráfica de la dosificación del hormigón

4.2.5 Secuencia y procedimiento de amasado para la fabricación del hormigón

Los materiales necesarios para la fabricación de hormigón fueron almacenados en la cámara climática 3 días antes de ejecutar las amasadas, lo anterior para estar sometidos a los ciclos térmicos y reproducir así lo mejor posible las condiciones de contorno reales. El tiempo total de amasado de los hormigones fue de 4 minutos. En el amasado se siguió la siguiente secuencia de adición de materiales, todo ello con la amasadora puesta en marcha:

1. Agua (inicialmente se mezclaron 300 ml de agua con todo el aditivo).
2. Áridos de mayor a menor tamaño.
3. Cemento (justo al finalizar la adición del cemento se amasó el hormigón durante 90 segundos).
4. A la terminación de los 90 segundos indicados anteriormente se adiciona el aditivo diluido en 300 ml de agua (al finalizar la adición del aditivo se amasó por 120 segundos más).
5. Se extrae el hormigón para realizar las pruebas necesarias.

Esta secuencia de adición de materiales trata de reflejar las condiciones de producción reales de hormigón preparado en planta, lo anterior con el objeto de reproducir al máximo las condiciones de fabricación del hormigón a nivel industrial.

4.2.6 Fabricación de las probetas de hormigón

El volumen de fabricación de hormigón de cada amasada fue de 37 litros, en función de la capacidad de la amasadora eléctrica utilizada (ver **figura 4.3**). De cada amasada se obtuvo la consistencia del hormigón fresco mediante el cono de Abrams [ASTM C143/C143M-00] (ver **figura 4.4**) y se elaboraron 5 probetas cilíndricas de 15 centímetros de diámetro por 30 centímetros de altura (ver **figura 4.5**), [ASTM C192/C192M-00]. De las 5 probetas elaboradas se programaron 2 para ensayarlas a compresión simple a 7 días y 3 a 28 días [ASTM C39/C39M-01].

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, lo anterior puede verse en la **figura 4.6**.



Figura 4.3.- Amasadora eléctrica utilizada



Figura 4.4.- Medida de la consistencia



Figura 4.5.- Elaboración de probetas



Figura 4.6.- Protección de las probetas

Los días de fabricación de hormigón correspondientes a condiciones de verano e invierno se muestran a continuación en la [tabla 4.2](#):

Serie	Hormigón	Condiciones térmicas	Fecha
Serie 1	Amasada referencia	Control (20 °C temp., 95% HR)	15 de enero de 2002
Serie 2	Desmoldeo a 24 horas	Verano (condiciones variables)	23 de enero de 2002
Serie 3	Desmoldeo a 48 horas	Verano (condiciones variables)	29 de enero de 2002
Serie 4	Desmoldeo a 72 horas	Verano (condiciones variables)	5 de febrero de 2002
Serie 5	Desmoldeo a 24 horas	Invierno (condiciones variables)	11 de marzo de 2002
Serie 6	Desmoldeo a 48 horas	Invierno (condiciones variables)	13 de marzo de 2002
Serie 7	Desmoldeo a 72 horas	Invierno (condiciones variables)	18 de marzo de 2002

Tabla 4.2.- Fechas de elaboración de los diferentes hormigones estudiados

4.2.7 Ensayos de caracterización realizados

Como se mencionó anteriormente, la razón de ser de estos ensayos es la de conocer la influencia de las condiciones térmicas y de la edad de desmoldeo sobre la resistencia a compresión del hormigón, por lo tanto, 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 en una máquina servohidráulica controlada por un ordenador.

4.3 RESULTADOS TÉRMICOS

4.3.1 Condiciones térmicas de referencia (serie 1)

En la **figura 4.7** se muestra la evolución térmica presentada por el hormigón de la serie de referencia durante las primeras 28 horas (temperatura 20 °C y humedad relativa 95%, ambas constantes). La amasada de referencia fue realizada el martes 15 de Enero de 2002. Los registros obtenidos mediante los dispositivos de adquisición de datos térmicos corresponden a la temperatura ambiente y a la temperatura medida en el interior de una de las probetas de hormigón.

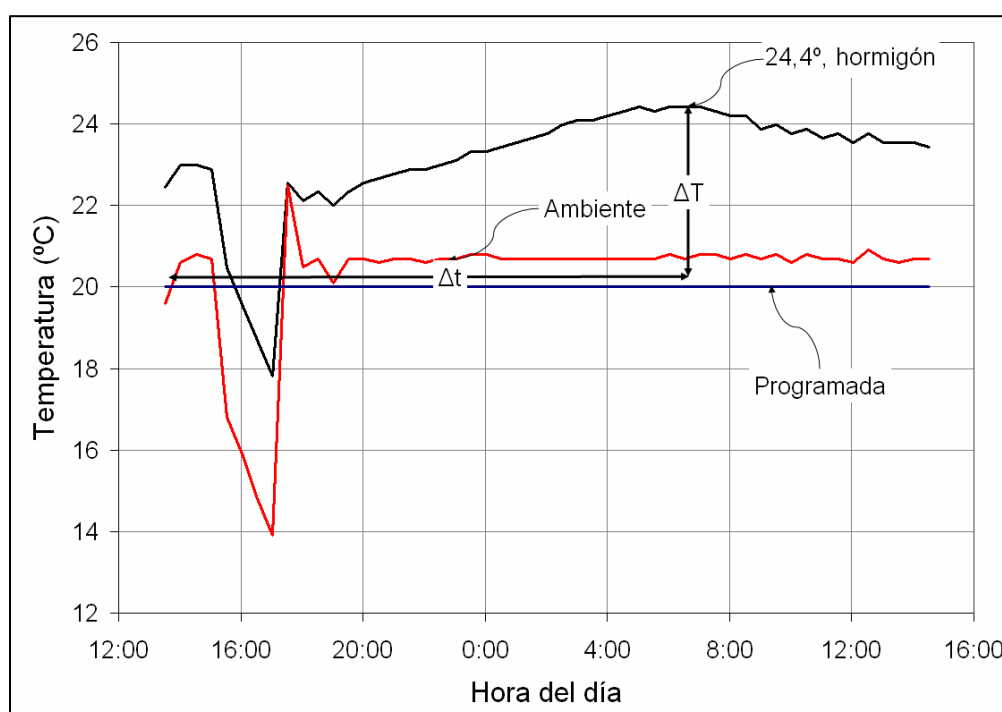


Figura 4.7.- Evolución térmica del hormigón de la serie de referencia

En la figura anterior puede observarse la desviación del registro de la temperatura ambiente respecto a la temperatura programada constante de 20°C. Este resultado puede responder, muy probablemente a que se produjese una cierta anomalía en la cámara, ya que los registros de los dos dispositivos los reflejan.

Una vez corregida esa disfunción, las diferencias de temperatura entre la estipulada en la cámara y la medida en el ambiente, responden, probablemente a la diferencia de ubicación de los registros en la cámara (dentro de la cámara climática, el dispositivo adquisidor, se ubicó muy cerca de la salida de aire caliente y el sensor de temperatura estaba ubicado cerca de la puerta de salida). Por otro lado, la temperatura

desarrollada por el hormigón viene afectada por la curva típica de liberación de calor de hidratación de hormigón elaborado con cemento Portland.

4.3.2 Condiciones térmicas de verano

Serie 2 (desmoldeo a 24 horas)

Las amasadas correspondientes a la serie 2 fueron realizadas el miércoles 23 de Enero de 2002. En la **figura 4.8** se muestra la evolución de la temperatura registrada en la cámara, con relación a la programada durante el ciclo de desmoldeo a 24 horas. En ella puede verse una buena concordancia entre la temperatura registrada y la temperatura programada. Las pequeñas diferencias responden a las distintas ubicaciones de los registros.

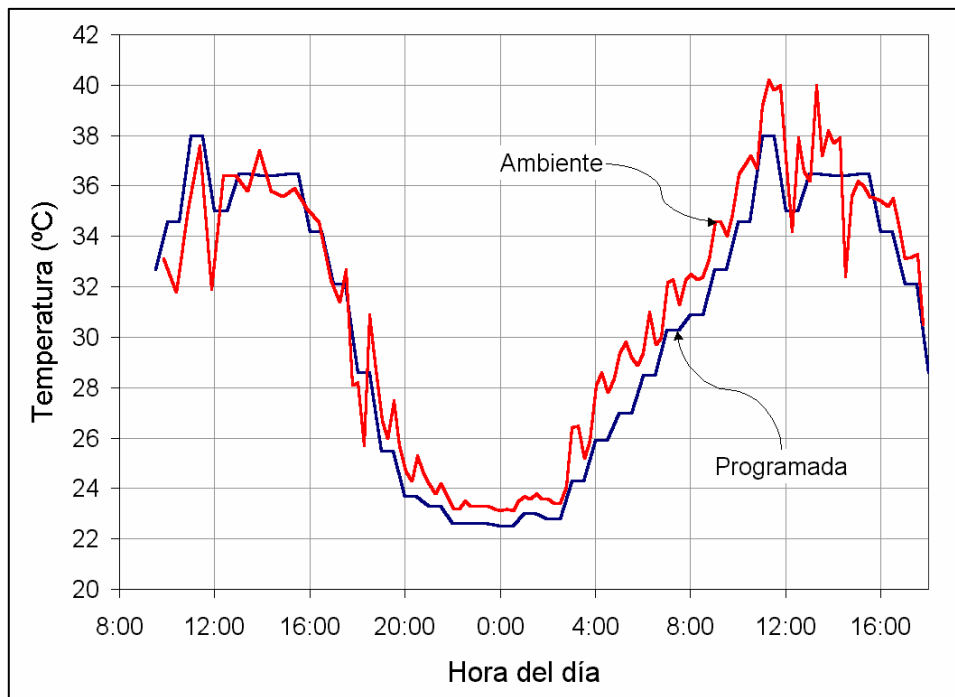


Figura 4.8.- Temperatura programada y ambiente en cámara para la serie 24 horas

En la **figura 4.9** se muestran los resultados de las temperaturas medidas dentro de las probetas de hormigón para cada una de las distintas horas de fabricación. Los registros de las mismas se hicieron mediante sondas termopares y dispositivos de adquisición de registros térmicos.

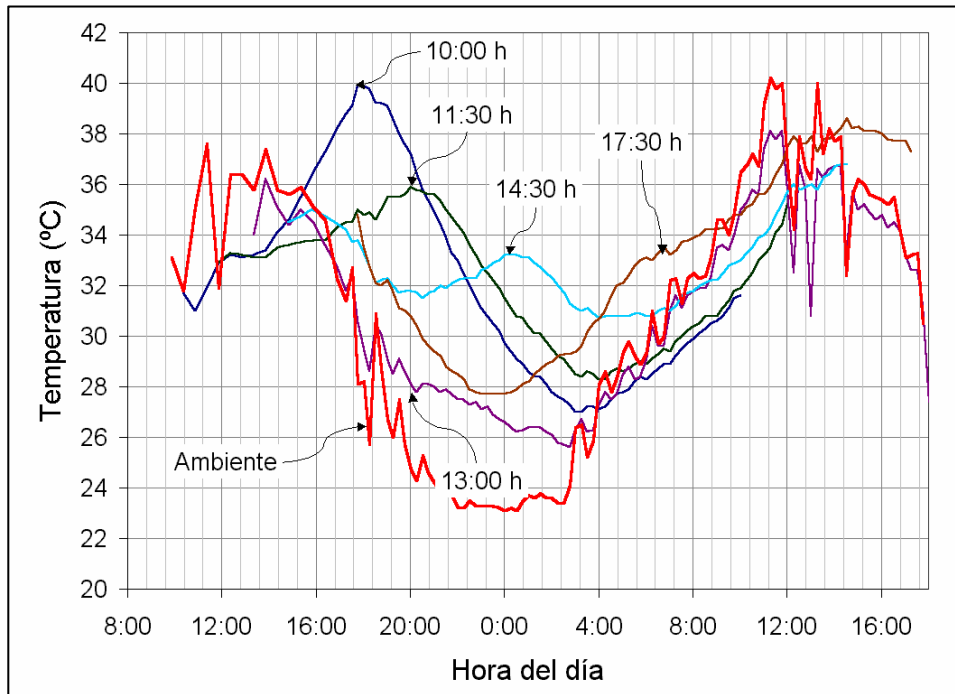


Figura 4.9.- Evolución térmica del hormigón de la serie desmoldeo a 24 horas

Podemos observar en la figura anterior que los registros de la temperatura mantienen una tendencia común, excepto el correspondiente al hormigón fabricado a las 13:00 horas, en el que el tipo de curva parece apunta la existencia de algún problema en el dispositivo de registro, por lo que no se tendrá en cuenta en el análisis.

Por otro lado, en la [figura 4.10](#) se muestran en detalle los resultados obtenidos en los primeros instantes del hormigón.

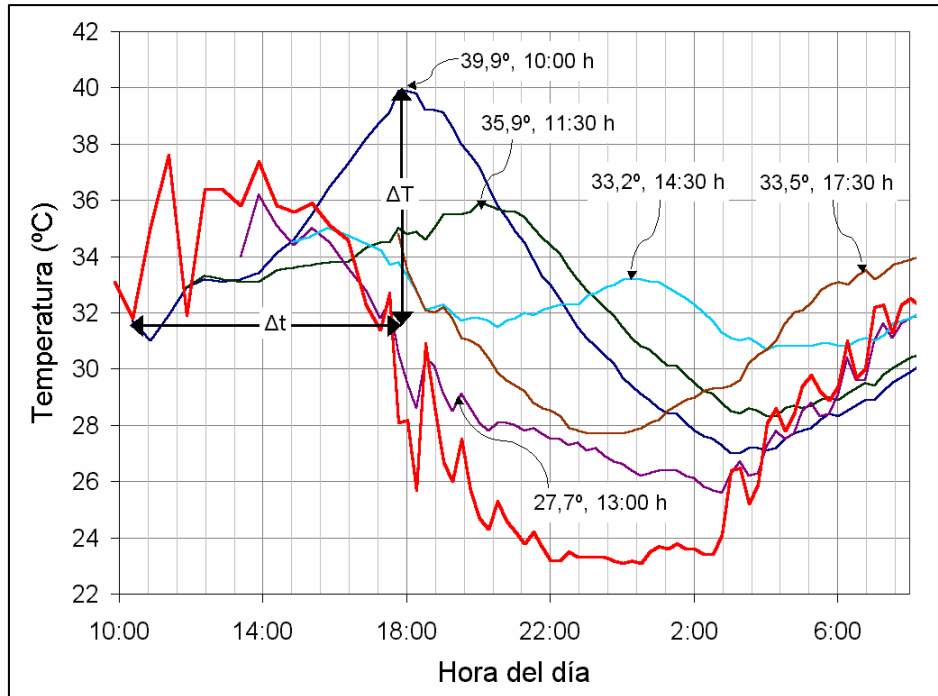


Figura 4.10.- Detalle a primeras edades del hormigón de la serie 24 horas

En la figura anterior se ha representado el tiempo que transcurre entre el inicio del hormigonado y el tiempo que se alcanza la temperatura máxima correspondiente a las reacciones exotérmicas (Δt) y la variación térmica (ΔT) correspondiente a la diferencia entre la temperatura máxima (T_{max}) y la temperatura inicial (T_i) del hormigón. En esta gráfica puede verse que ese tiempo aumenta a medida que avanzamos en las horas del día. Así cuando los incrementos de las temperaturas por el ambiente y por las reacciones están en el mismo sentido, la cinética es más rápida y, consecuentemente, los tiempos más pequeños. Asimismo puede verse que la variación de temperatura entre la inicial y la considerada máxima por las reacciones exotérmicas, disminuye a medida que avanza la hora de hormigonado. Todo esto evidentemente puede tener consecuencias sobre las características mecánicas, por lo que se estudiará en detalle con posterioridad.

A continuación se muestra la [tabla 4.3](#), en donde se han obtenido los valores de los parámetros siguientes: temperatura inicial del hormigón (T_i), temperatura máxima del hormigón (T_{max}), variación térmica (ΔT) y tiempo de reacción (Δt) para cada una de las horas de fabricación e incluyendo también los resultados de la serie de referencia.

Hora de fabricación	T _i (°C)	T _{max} (°C)	ΔT (°C)	Δt (horas)
Referencia	22,4	24,4	2,0	17,00
10:00 horas	31,7	39,9	8,2	7,65
11:30 horas	32,9	35,9	3,0	8,15
13:00 horas	34,0	27,9	-6,1	8,15
14:30 horas	34,5	33,2	-1,3	9,48
17:30 horas	34,8	33,5	-1,3	13,00

Tabla 4.3.- Resultados térmicos, serie 24 horas

En la tabla anterior pueden apreciarse los aspectos mencionados anteriormente en relación a que los valores de ΔT disminuyen a medida que avanza la hora de fabricación, y los valores de Δt son mayores a primeras horas del día y viceversa. Todas estas relaciones se muestran gráficamente a continuación en la **figura 4.11**, cabe mencionar que los puntos correspondientes a la hora de fabricación 13:00 horas se eliminaron debido al problema de lectura anteriormente señalado, por lo tanto se han sombreado con amarillo en dicha tabla.

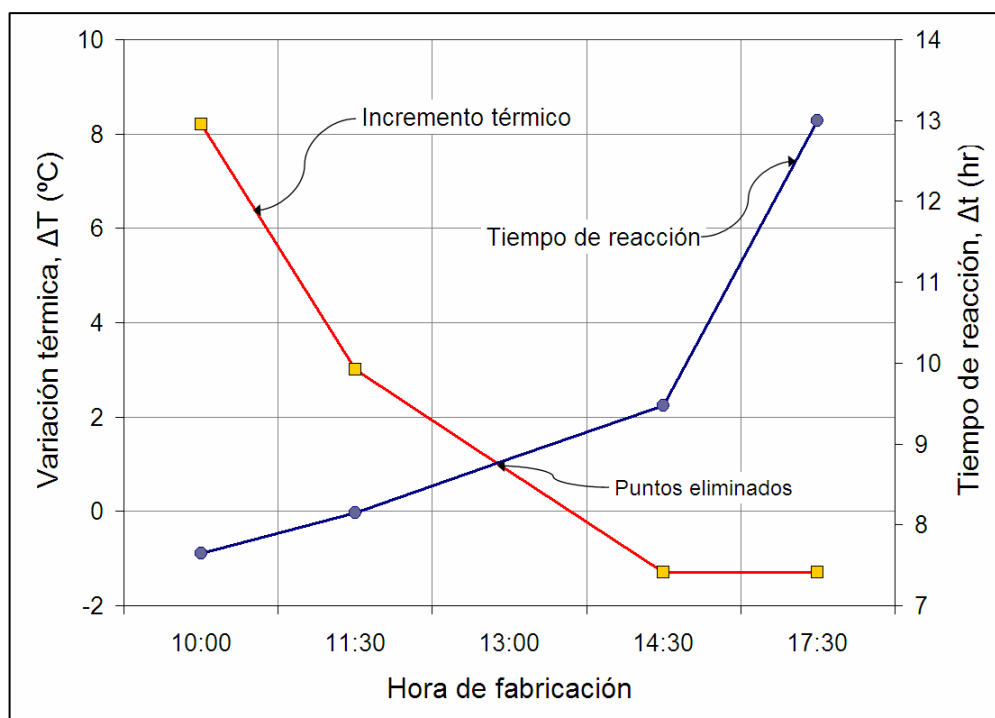


Figura 4.11.- Relaciones entre ΔT y Δt , serie 24 horas

Serie 3 (desmoldeo a 48 horas)

Las amasadas correspondientes a la serie 3 fueron realizadas el martes 29 de Enero de 2002. En la **figura 4.12** se presentan los perfiles térmicos de la temperatura ambiente de la cámara y de la temperatura programada.

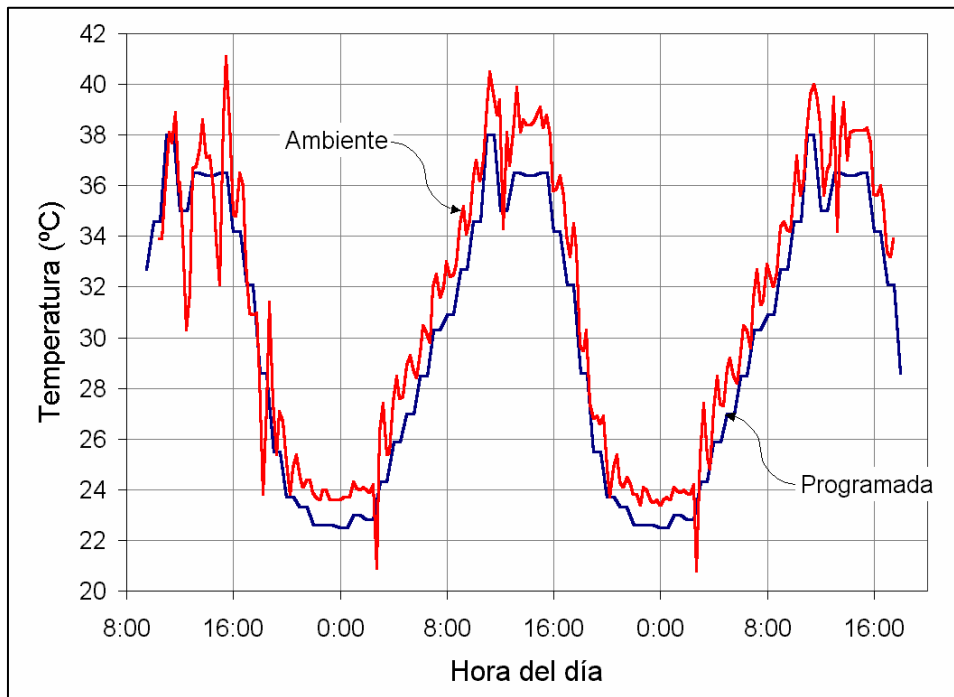


Figura 4.12.- Temperatura programada y ambiente en cámara para la serie 48 horas

En esta figura puede verse una buena concordancia entre los registros previstos y los medidos, siendo las diferencias imputables a las distintas ubicaciones de los registros, tal como se ha señalado con anterioridad. Las mayores dispersiones que se producen en las primeras horas son consecuencia de que durante la realización de los hormigones la apertura y cierre de las puertas fue muy frecuente ya que era necesario entrar y salir de la cámara para la limpieza del equipo utilizado.

En la **figura 4.13** se presentan los registros de temperatura dentro de las probetas de hormigón para las diferentes horas de fabricación. En ella puede verse una mayor dispersión en las primeras 24 horas, si bien en las segundas 24 horas (una vez no se nota la influencia de las reacciones exotérmicas) la dispersión es pequeña y acompañan al ciclo de temperatura ambiente. Con respecto a este hay un cierto desplazamiento consecuencia de la inercia térmica del hormigón y del espesor de la probeta.

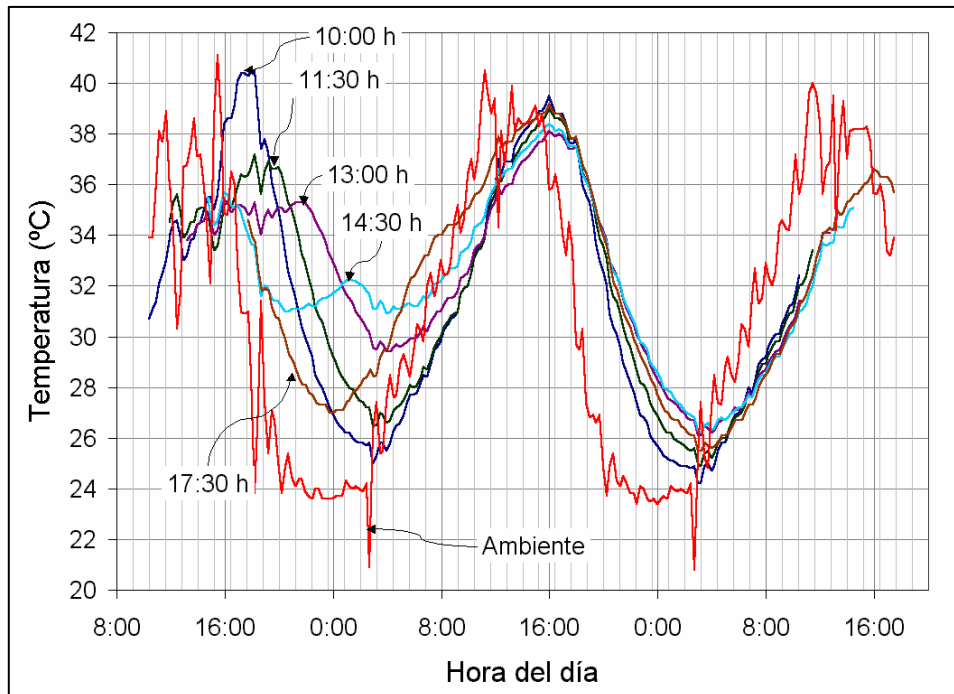


Figura 4.13.- Evolución térmica del hormigón de la serie desmoldeo a 48 horas

De forma análoga, al ciclo de 24 horas, en la [figura 4.14](#) se muestra un detalle de las primeras 24 horas, señalándose el tiempo transcurrido entre el inicio y la temperatura asociada a la máxima por reacciones exotérmicas. Asimismo se señala la variación de temperatura, producido entre esos instantes.

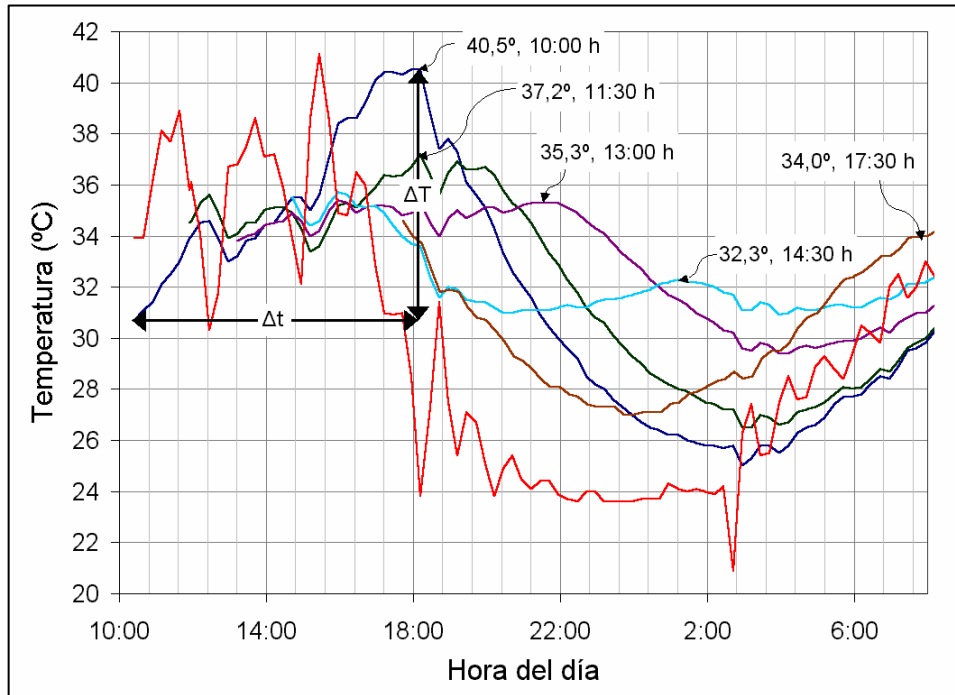


Figura 4.14.- Detalle a primeras edades del hormigón de la serie 48 horas

En esta figura puede verse que todas las probetas siguen la secuencia prevista. Así pues la exclusión del registro de las 13:00 horas de la serie anterior resulta contrastado por la secuencialidad de esta serie. Por otro lado puede apreciarse, lo mismo que en el caso anterior, que los tiempos aumentan a medida que avanza la hora de hormigonado y que las variaciones de temperatura disminuyen, asimismo, a medida que avanza la hora de hormigonado.

Todo ello pone en evidencia nuevamente que si los incrementos de las temperaturas por el ambiente y por las reacciones están en el mismo sentido, la cinética es más rápida y, consecuentemente, los tiempos más pequeños y con mayores variaciones de temperatura. Ello evidentemente puede tener consecuencias sobre las características mecánicas, por lo que se estudiará en detalle con posterioridad.

A continuación se muestra la **tabla 4.4** en donde se han obtenido los valores correspondientes a los parámetros térmicos anteriormente mencionados.

Hora de fabricación	T _i (°C)	T _{max} (°C)	ΔT (°C)	Δt (horas)
Referencia	22,4	24,4	2,0	17,00
10:00 horas	34,5	36,9	2,4	7,30
11:30 horas	33,8	35,3	1,5	8,25
13:00 horas	35,5	32,3	-3,2	10,50
14:30 horas	34,6	34,0	-0,6	14,00
17:30 horas	30,7	40,5	9,8	7,55

Tabla 4.4.- Resultados térmicos, serie 48 horas

A continuación se muestran gráficamente los resultados de la tabla anterior en la figura 4.15.

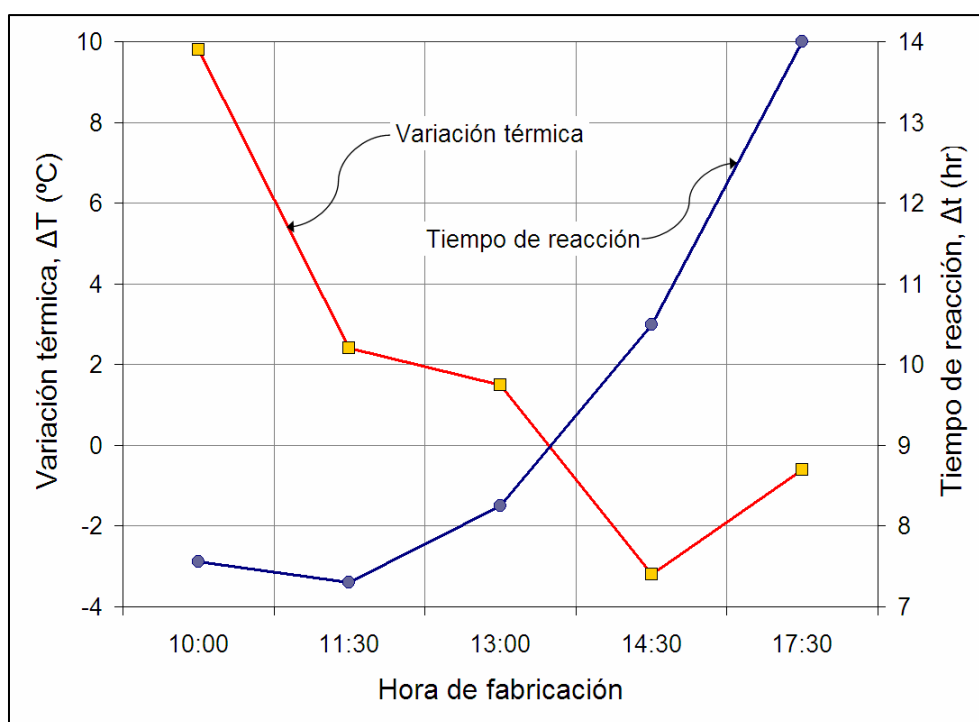


Figura 4.15.- Relaciones entre ΔT y Δt, serie 48 horas

Serie 4 (desmoldeo a 72 horas)

La serie 4 fue realizada el día martes 5 de Febrero de 2002. En la figura 4.16 se muestra la temperatura ambiente en la cámara durante los tres días que se mantuvieron en la misma y la temperatura programada. En ella puede apreciarse la buena

concordancia en todo el período entre la temperatura programada y la temperatura registrada.

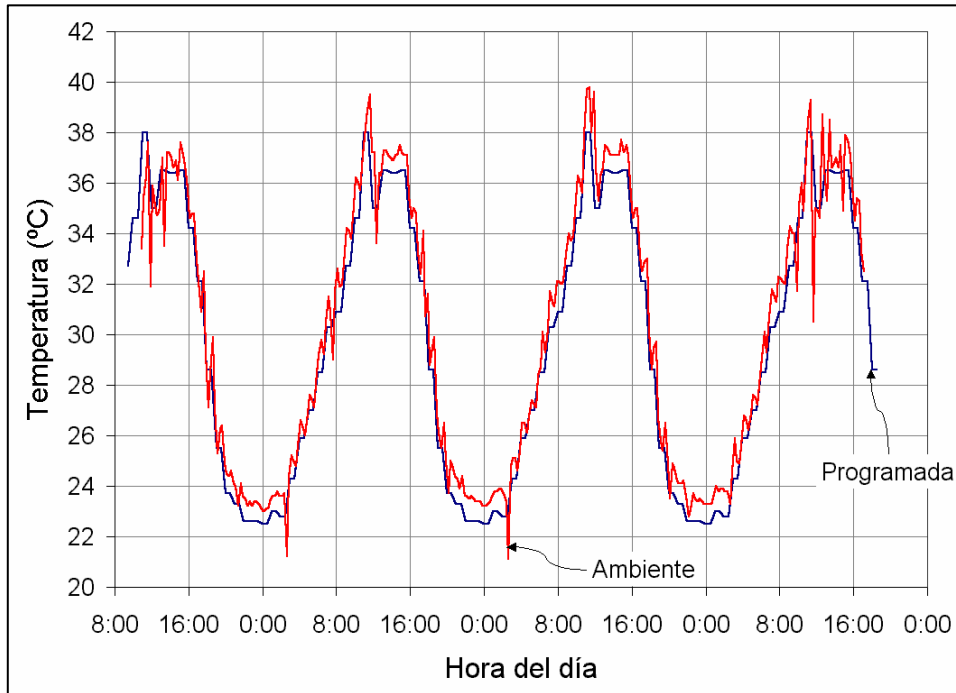


Figura 4.16.- Temperatura programada y ambiente en cámara para la serie 72 horas

En la **figura 4.17** se presenta la temperatura registrada en las probetas de hormigón durante las 72 horas antes de desmoldear. En ella puede verse algunas de las constantes apuntadas con anterioridad: la mayor dispersión de las primeras 24 horas, la buena concordancia a partir de esas horas, la inercia térmica del hormigón, por lo que no se insiste nuevamente en el tema.

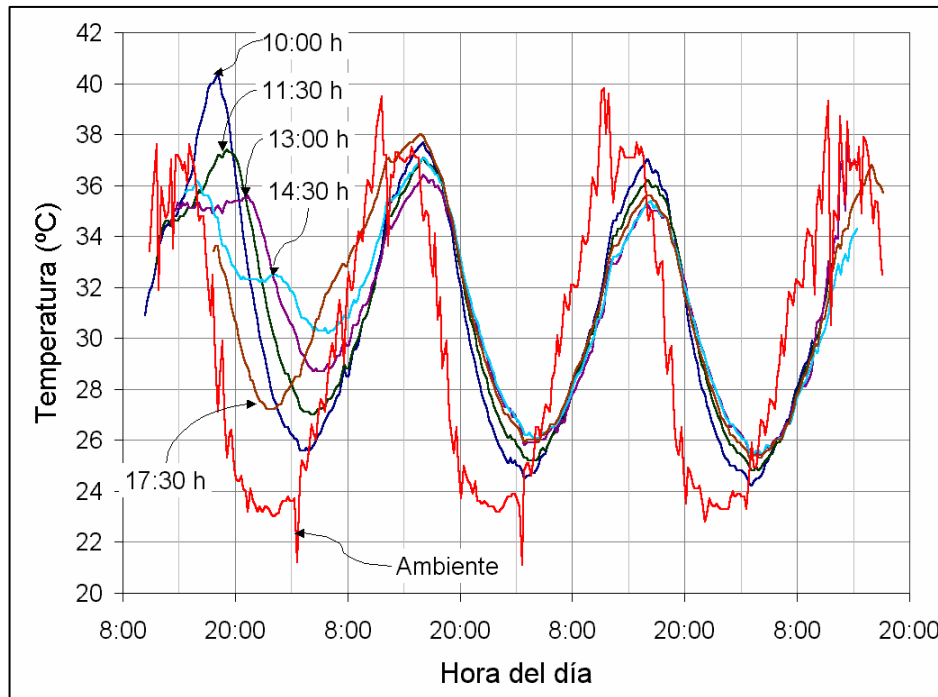


Figura 4.17.- Evolución térmica del hormigón de la serie desmoldeo a 72 horas

A continuación se muestra la **figura 4.18**, en la cual se muestra un detalle de la evolución de la temperatura del hormigón a las primeras horas. Igualmente se muestra la temperatura máxima.

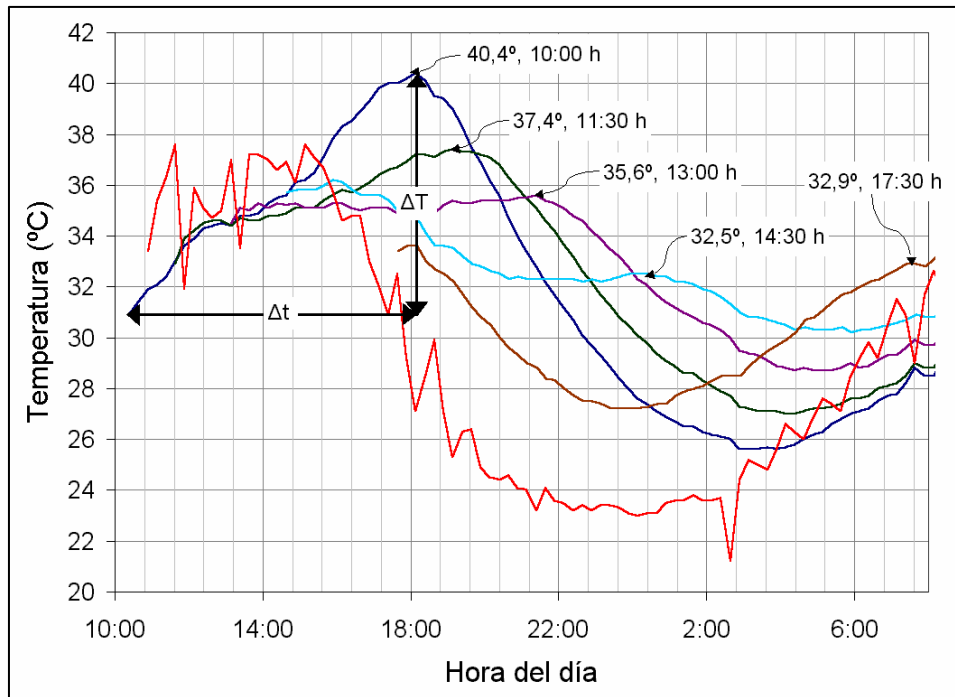


Figura 4.18.- Detalle a primeras edades del hormigón de la serie 72 horas

Nuevamente se repite el hecho de que a medida que avanza la hora de hormigonado, la variación de temperatura alcanzada disminuye, aumentando el tiempo correspondiente a la temperatura máxima, y viceversa.

De igual forma que en las series anteriores, a continuación se presentan en la **tabla 4.5** los valores obtenidos de los parámetros térmicos.

Hora de fabricación	T_i (°C)	T_{max} (°C)	ΔT (°C)	Δt (horas)
Referencia	22,4	24,4	2,0	17,00
10:00 horas	30,9	40,4	9,5	7,75
11:30 horas	32,9	37,4	4,5	7,50
13:00 horas	34,5	35,6	1,1	8,25
14:30 horas	35,7	32,5	-3,2	9,50
17:30 horas	33,4	32,9	-0,5	13,75

Tabla 4.5.- Resultados térmicos, serie 72 horas

Asimismo se incluye la **figura 4.19** en donde se han graficado los datos anteriormente mostrados.

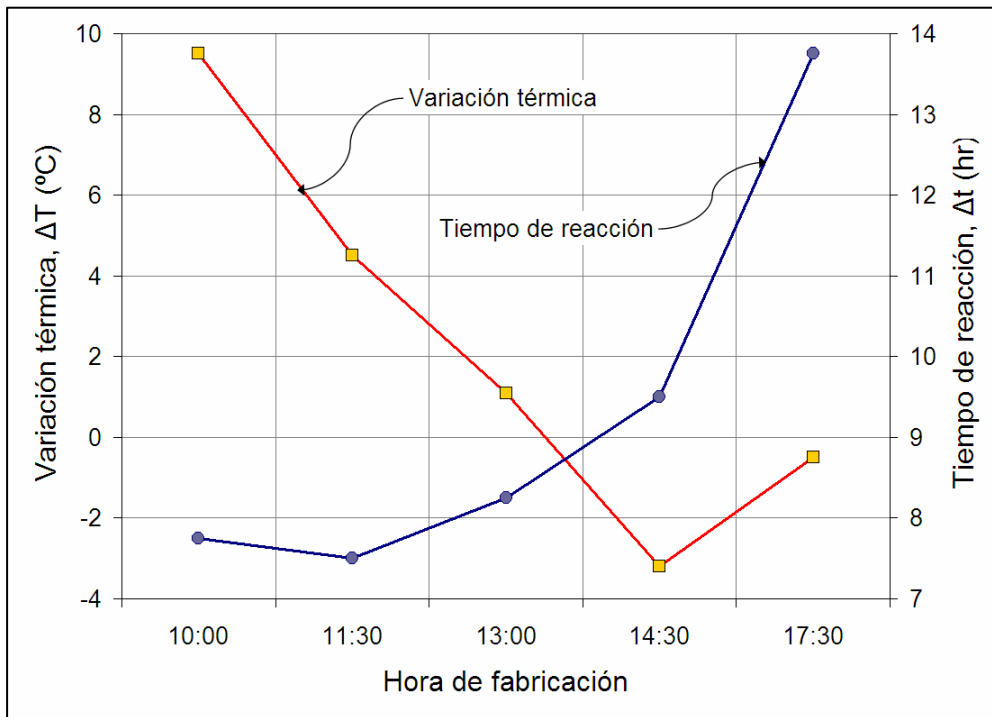


Figura 4.19.- Relaciones entre ΔT y Δt , serie 72 horas

4.3.3 Promedio de resultados térmicos (verano)

En los apartados anteriores puede verse que los perfiles térmicos de los hormigones fabricados a cada hora presentan el mismo comportamiento en todas las series de desmoldeo, habiendo algunas excepciones como en el caso del hormigón fabricado a las 13:00 horas en la serie 2 (desmoldeo a 24 horas) en donde la curva térmica presenta un comportamiento atípico debido probablemente a un mal funcionamiento de la sonda termopar o del dispositivo (squirrel). De igual forma las relaciones entre los valores medidos de ΔT y Δt son casi iguales presentando las mismas tendencias para todas las series.

Asimismo, podemos señalar que el tiempo de reacción (Δt) transcurrido entre el momento de la temperatura inicial (T_i) y el momento de máxima temperatura (T_{max}) es mayor en las últimas horas del día, e igualmente este tiempo es menor en las primeras horas del día. De esta forma, cuando las variaciones de temperatura (ΔT), debidas a la temperatura ambiente y a las reacciones exotérmicas del cemento en el hormigón, son en el mismo sentido (pendiente positiva), la cinética es más rápida y consecuentemente los tiempos de reacción (Δt) son menores. Igualmente, se puede ver que la variación térmica (ΔT) entre la temperatura inicial (T_i) y la temperatura máxima (T_{max}) debida a las reacciones exotérmicas, disminuye en las últimas horas del día y viceversa. Estas menores variaciones de temperatura pudieran tener efectos positivos desde el punto de vista de la resistencia mecánica.

Los aspectos anteriormente señalados pueden explicarse de la siguiente manera. Un incremento en la temperatura de curado acelera las reacciones químicas de hidratación y la exposición del hormigón a una elevada temperatura durante y después del contacto inicial del cemento con el agua, reduce la duración del período durmiente y esto ocasiona que toda la estructura de la pasta de cemento hidratado se establezca muy prematuramente. [Neville, 1999] Podemos mencionar aquí un axioma de la química física que dice: la velocidad de reacción es duplicada si la temperatura bajo la cual el proceso se lleva a cabo es incrementada en 10 °C. [Rastrup, 1954]

A manera de resumen en la **tabla 4.6** se muestran los resultados térmicos obtenidos del promedio de los parámetros indicados de todas las series, asimismo se indica la desviación estándar y el coeficiente de variación. Cabe mencionar que se han eliminado algunos valores extremos que estaban fuera de rango y que probablemente se debe a errores de medición en la sonda termopar o en el dispositivo (squirrel), el criterio de eliminación correspondió a valores que superaban el 10% de coeficiente de variación. En dicha tabla, ‘ μ ’ es el valor de la media en °C, ‘ σ ’ es el valor de la desviación estándar en °C y ‘C.V.’ es el coeficiente de variación en %.

Parámetro	T _i (°C)			T _{max} (°C)			ΔT (°C)			Δt (horas)		
	μ	σ	C.V.	μ	σ	C.V.	μ	σ	C.V.	μ	σ	C.V.
Serie												
Hora de fabricación												
Referencia	22,4	-	-	24,5	-	-	2,1	-	-	17,00	-	-
10:00 horas	31,1	0,529	1,7%	40,3	0,321	0,8%	9,2	0,850	9,3%	7,7	0,100	1,3%
11:30 horas	33,5	0,924	2,8%	36,8	0,764	2,1%	3,3	1,082	32,8%	7,7	0,444	5,8%
13:00 horas	34,2	0,361	1,1%	35,5	0,212	0,6%	1,3	0,283	21,8%	8,2	0,000	0,0%
14:30 horas	33,6	0,643	1,8%	32,4	0,473	1,4%	-1,2	0,000	0,0%	9,8	0,583	5,9%
17:30 horas	34,1	0,757	2,2%	33,5	0,551	1,6%	-0,6	0,071	-12,9%	13,6	0,520	3,8%

Tabla 4.6.- Promedio de resultados térmicos (verano)

De igual forma que para cada una de las series, para el resumen anteriormente mostrados se han graficado estos valores y se muestran a continuación en la **figura 4.20**.

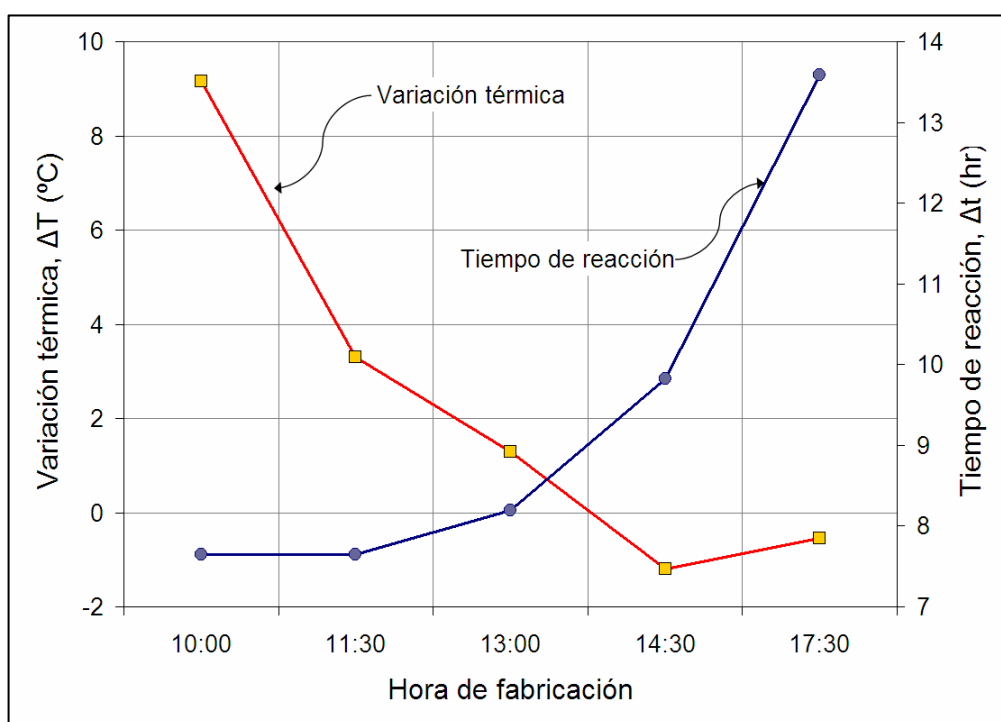


Figura 4.20.- Relaciones entre ΔT y Δt , resumen de todas las series

Finalmente y a manera de resumen podemos decir que los comportamientos de ΔT y Δt muestran tendencias claramente distinguibles y que son inversas entre sí. Sin embargo, para las horas de fabricación 14:30 y 17:30 hrs las tendencias no son claras, pudiendo esperar que el valor de 14:30 fuera mayor o que el valor de 17:30 menor. Posteriormente tratará de explicarse esta cuestión con mayor profundidad.

4.3.4 Condiciones térmicas de invierno

Serie 5 (desmoldeo a 24 horas)

Las amasadas correspondientes a la serie 5 fueron realizadas el lunes 11 de Marzo de 2002. En la **figura 4.21** se muestra la evolución de la temperatura registrada en la cámara, con relación a la programada durante el ciclo de desmoldeo a 24 horas.

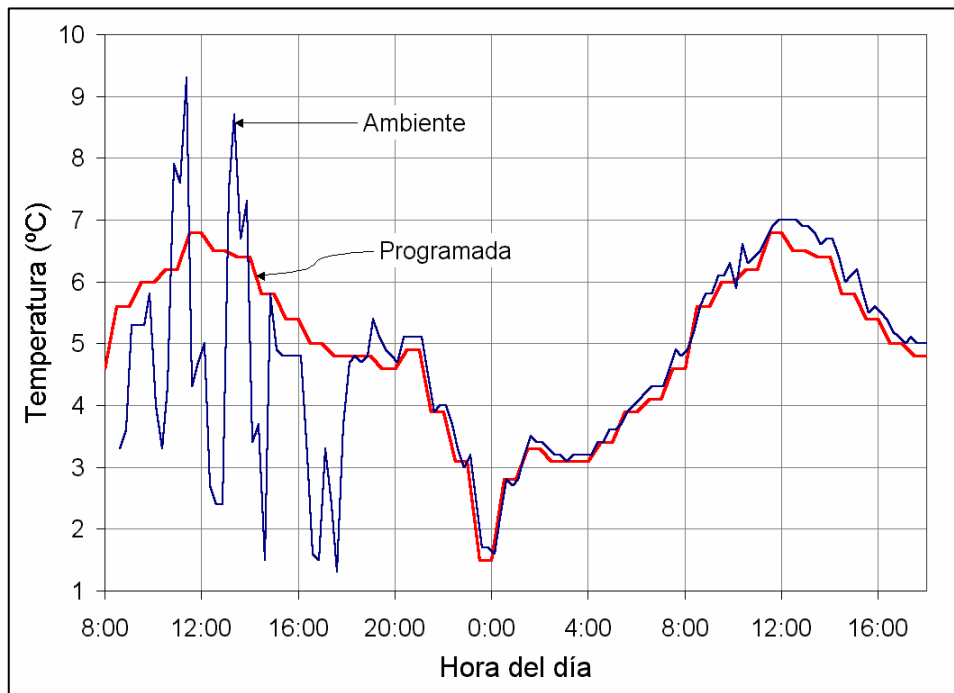


Figura 4.21.- Temperatura programada y ambiente en cámara para la serie 24 horas

Puede verse en la figura anterior una desviación importante en las primeras 10 horas entre la temperatura registrada y la programada, estas diferencias se deben a que en este intervalo de tiempo la puerta de la cámara climática fue abierta y cerrada con mucha frecuencia debido a las amasadas de ese día. Sin embargo, una vez alcanzada una situación permanente, los registros tienen una buena concordancia.

A continuación se muestra la **figura 4.22** que muestra los perfiles térmicos de los hormigones fabricados ese día para las distintas horas de fabricación.

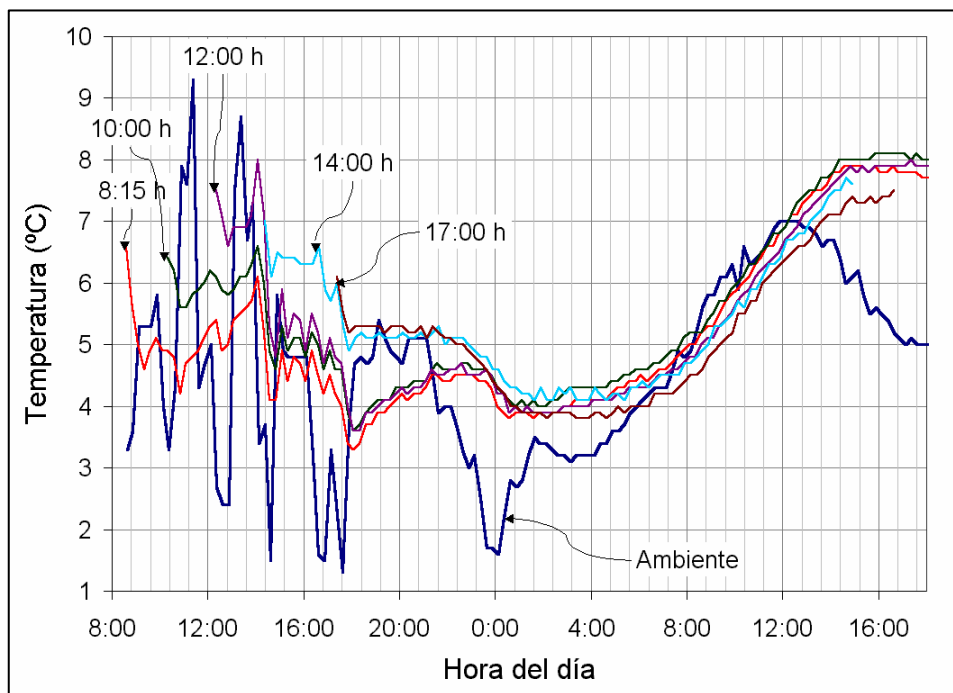


Figura 4.22.- Evolución térmica del hormigón de la serie desmoldeo a 24 horas

Los registros de la temperatura muestran, de igual forma, una gran dispersión térmica en las primeras horas fruto a las condiciones no constantes de la cámara climática. Sin embargo, con posterioridad, si existe una buena concordancia con los registros de las probetas de hormigón. En la [figura 4.23](#) se muestra un mayor detalle de esas horas.

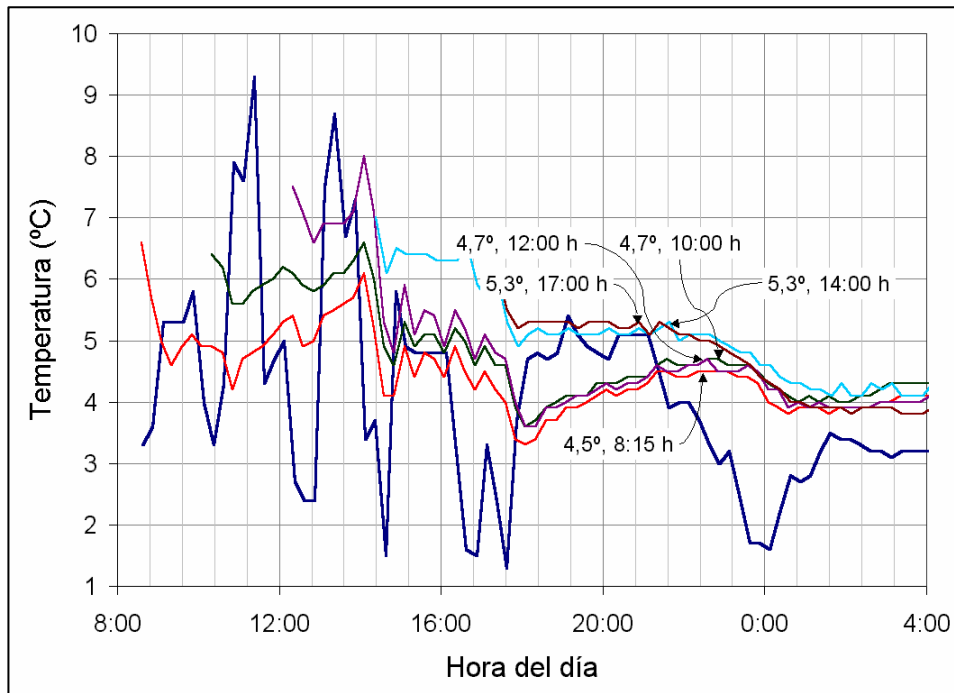


Figura 4.23.- Detalle a primeras edades del hormigón de la serie 24 horas

La figura anterior muestra en primer lugar una mayor dificultad de análisis, por las influencias térmicas antes citadas, respecto a las condiciones no constantes de la cámara durante la elaboración de las probetas. En esta figura, parece apuntarse que las máximas temperaturas por las reacciones exotérmicas (T_{max}) (las cuales se señalan en la figura) se producen en el entorno de las 21:00 a 22:00 horas, con unos valores relativamente similares (diferencias menores a 1 °C). Los tiempos desde el inicio al instante que se alcanza la máxima temperatura (Δt) parece que disminuyen a medida que se realiza más tarde el hormigonado.

A continuación se muestra la **tabla 4.7**, en donde se han obtenido los valores de los parámetros siguientes: temperatura inicial del hormigón (T_i), temperatura máxima del hormigón (T_{max}), variación térmica (ΔT) y tiempo de reacción (Δt) para cada una de las horas de fabricación e incluyendo también los resultados de la serie de referencia.

Hora de fabricación	T _i (°C)	T _{max} (°C)	ΔT (°C)	Δt (horas)
Referencia	22,4	24,4	2,0	17,00
8:15 horas	6,6	4,5	-2,1	14,50
10:00 horas	6,4	4,7	-1,7	12,50
12:00 horas	7,5	4,7	-2,8	10,25
14:00 horas	7,0	5,3	-1,7	8,50
17:00 horas	6,1	5,3	-0,8	5,50

Tabla 4.7.- Resultados térmicos, serie 24 horas

De igual forma que para todas las series de condiciones de verano, se muestra a continuación la **figura 4.24** en donde se grafican los valores de ΔT y Δt para cada hora de fabricación.

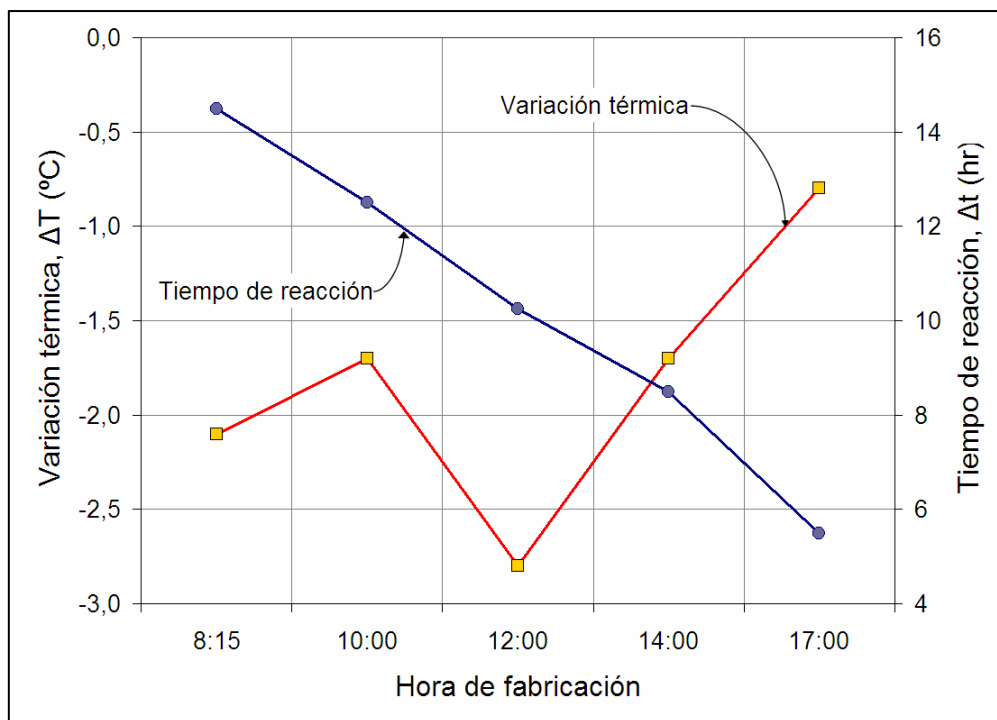


Figura 4.24.- Relaciones entre ΔT y Δt, serie 24 horas

En la figura anterior puede apreciarse que los valores de Δt disminuyen a medida que avanza la hora de fabricación, y los valores de ΔT tienen un comportamiento que no muestra ninguna tendencia específica, esperaremos a observar las siguientes series con el objeto de definir algún patrón de comportamiento.

Serie 6 (desmoldeo a 48 horas)

Las amasadas correspondientes a la serie 6 fueron realizadas el miércoles 13 de Marzo de 2002. En la **figura 4.25** se muestra la evolución de la temperatura registrada en la cámara, con relación a la programada durante el ciclo de desmoldeo a 48 horas.

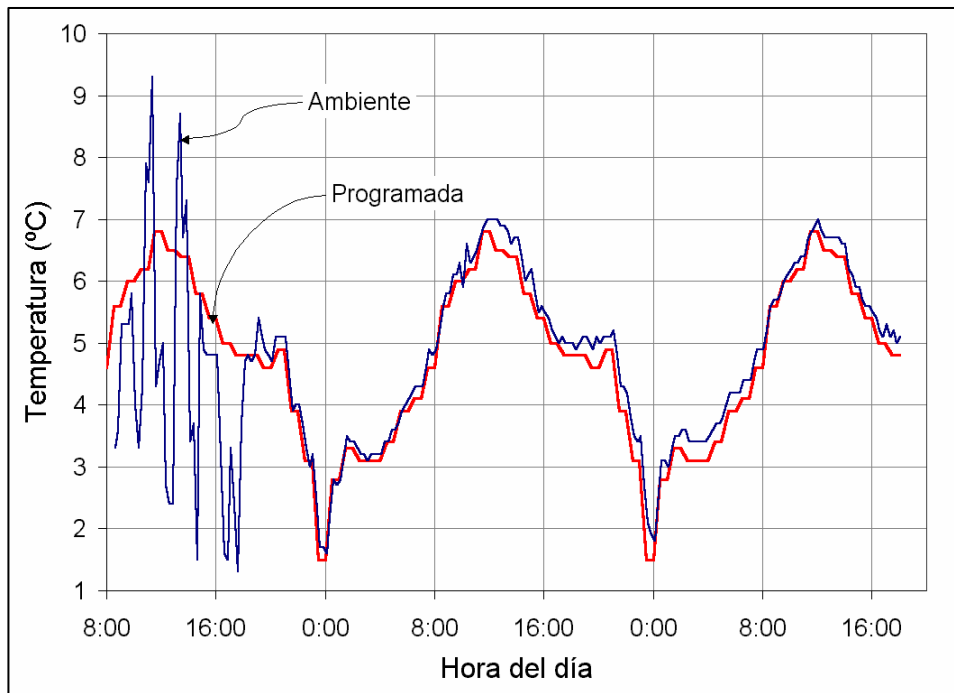


Figura 4.25.- Temperatura programada y ambiente en cámara para la serie 48 horas

Pueden verse en la figura anterior los mismos aspectos señalados para el caso de 24 horas en el sentido de la gran desviación en las primeras 10 horas entre la temperatura programada y la registrada.

A continuación se muestra la **figura 4.26** que muestra los perfiles térmicos de los hormigones fabricados ese día para las distintas horas de fabricación.

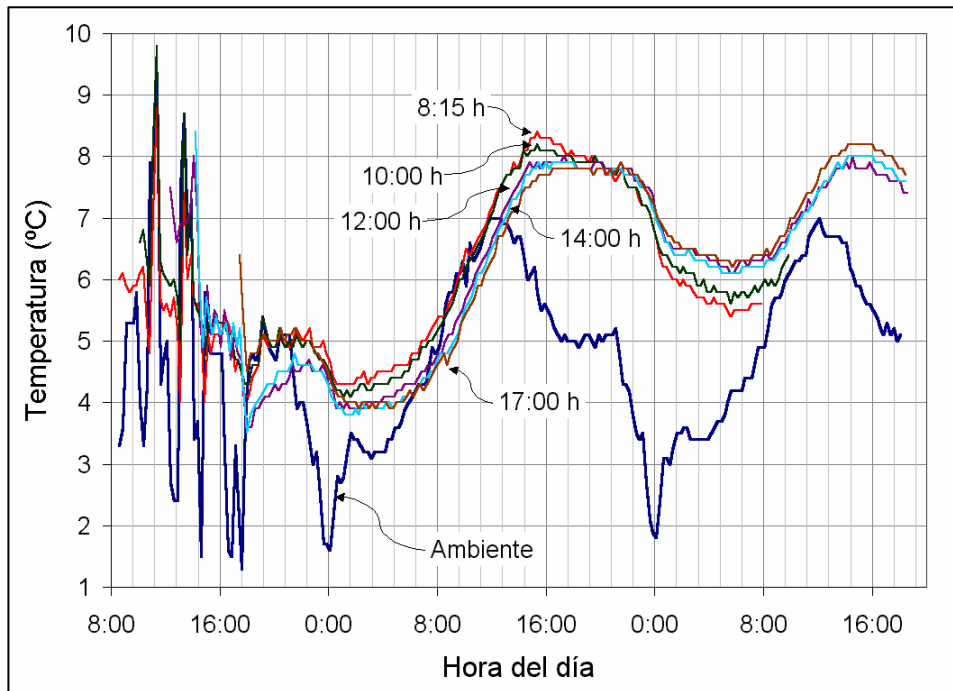


Figura 4.26.- Evolución térmica del hormigón de la serie desmoldeo a 48 horas

De igual forma, los registros de la temperatura muestran una gran dispersión térmica en las primeras horas fruto a las condiciones no constantes de la cámara climática. En la [figura 4.27](#) se muestra un mayor detalle de esas horas.

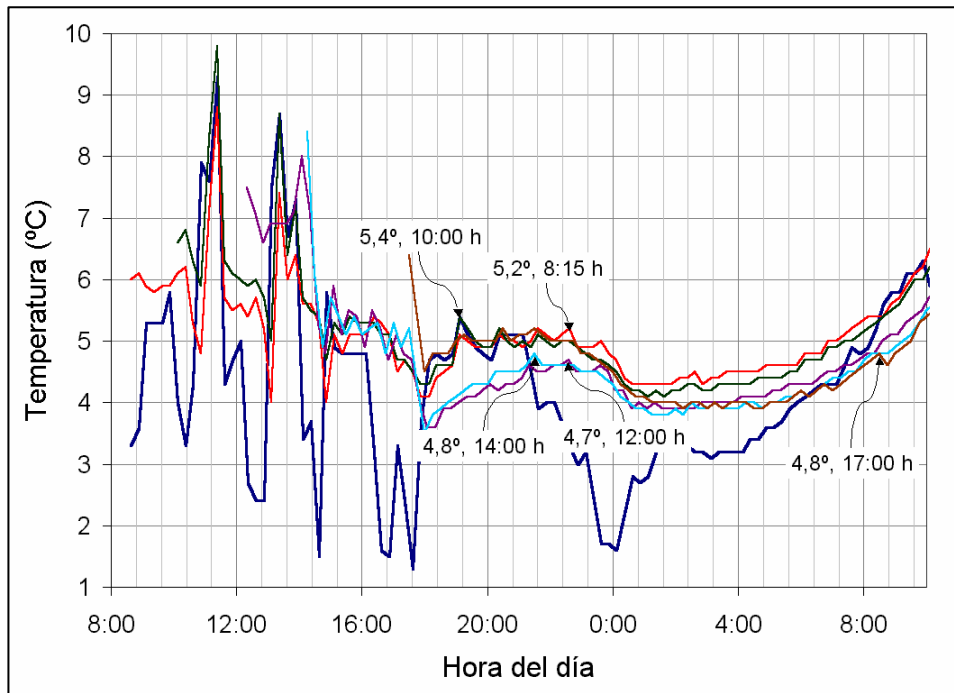


Figura 4.27.- Detalle a primeras edades del hormigón de la serie 48 horas

En la figura anterior puede notarse que la dificultad en la localización de las temperaturas máximas (T_{max}) se hace presente nuevamente. A continuación se muestra la **tabla 4.8**, en donde se han obtenido los valores de los parámetros mencionados anteriormente, se incluyen también los resultados de la serie de referencia.

Hora de fabricación	T_i (°C)	T_{max} (°C)	ΔT (°C)	Δt (horas)
Referencia	22,4	24,4	2,0	17,00
8:15 horas	6,0	5,2	-0,8	14,00
10:00 horas	6,6	5,4	-1,2	12,00
12:00 horas	7,5	4,7	-2,8	10,25
14:00 horas	8,4	4,8	-3,6	8,25
17:00 horas	6,4	4,8	-1,6	5,00

Tabla 4.8.- Resultados térmicos, serie 48 horas

De igual forma que para todas las series de condiciones de verano, se muestra a continuación la **figura 4.28** en donde se grafican los valores de ΔT y Δt para cada hora de fabricación.

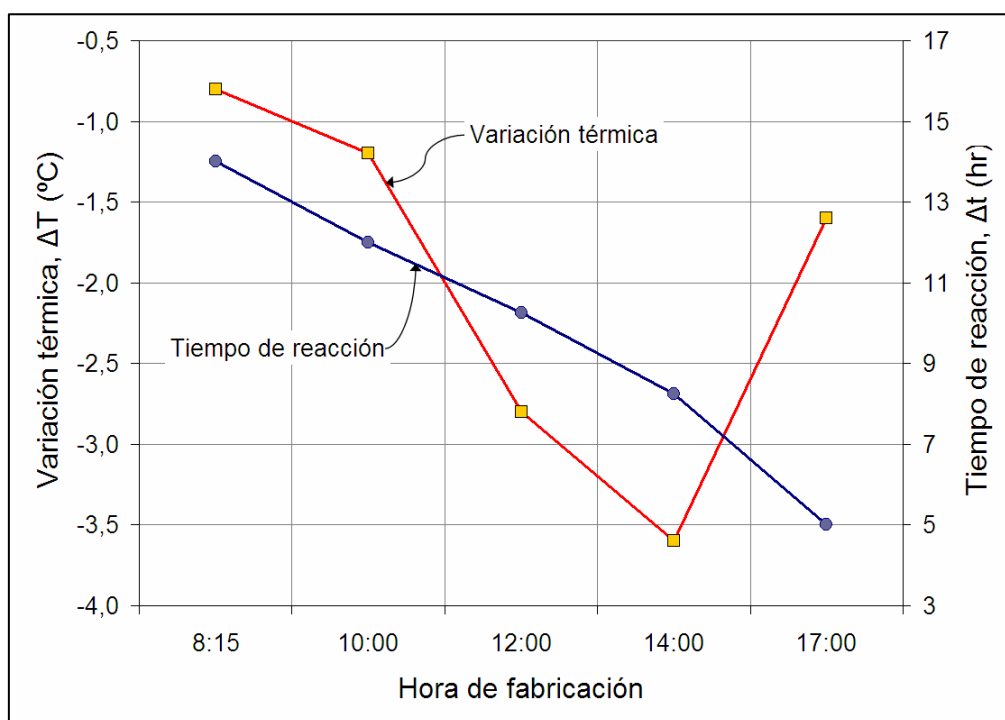


Figura 4.28.- Relaciones entre ΔT y Δt , serie 48 horas

En la figura anterior puede apreciarse que los valores de ΔT muestran un comportamiento decreciente hasta las 14:00 horas, donde posteriormente hay un incremento en el valor, cabe mencionar que este comportamiento es diferente para el caso de la serie de 24 horas. Para los valores de Δt la tendencia es decreciente conforme avanza la hora de hormigonado, este comportamiento es similar al observado en la serie anterior (24 horas).

Serie 7 (desmoldeo a 72 horas)

Las amasadas correspondientes a la serie 7 fueron realizadas el lunes 18 de Marzo de 2002. En la **figura 4.29** se muestra la evolución de la temperatura registrada en la cámara, con relación a la programada durante el ciclo de desmoldeo a 72 horas.

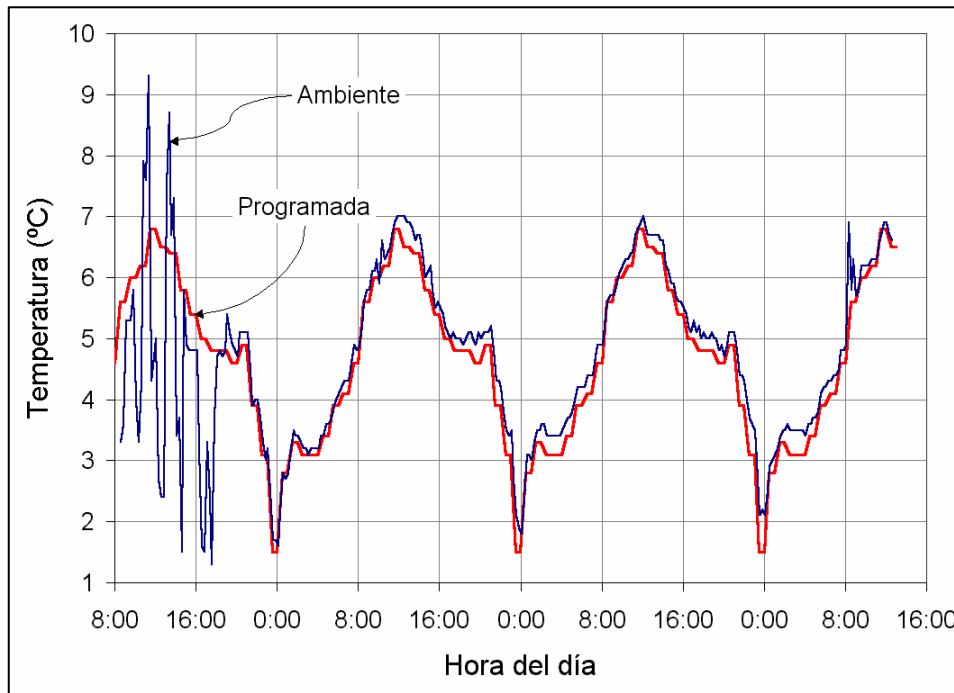


Figura 4.29.- Temperatura programada y ambiente en cámara para la serie 72 horas

Pueden verse en la figura anterior los mismos aspectos señalados para el caso de 24 y 48 horas en el sentido de la gran desviación en las primeras 10 horas entre la temperatura programada y la registrada.

A continuación se muestra la **figura 4.30** que muestra los perfiles térmicos de los hormigones fabricados ese día para las distintas horas de fabricación.

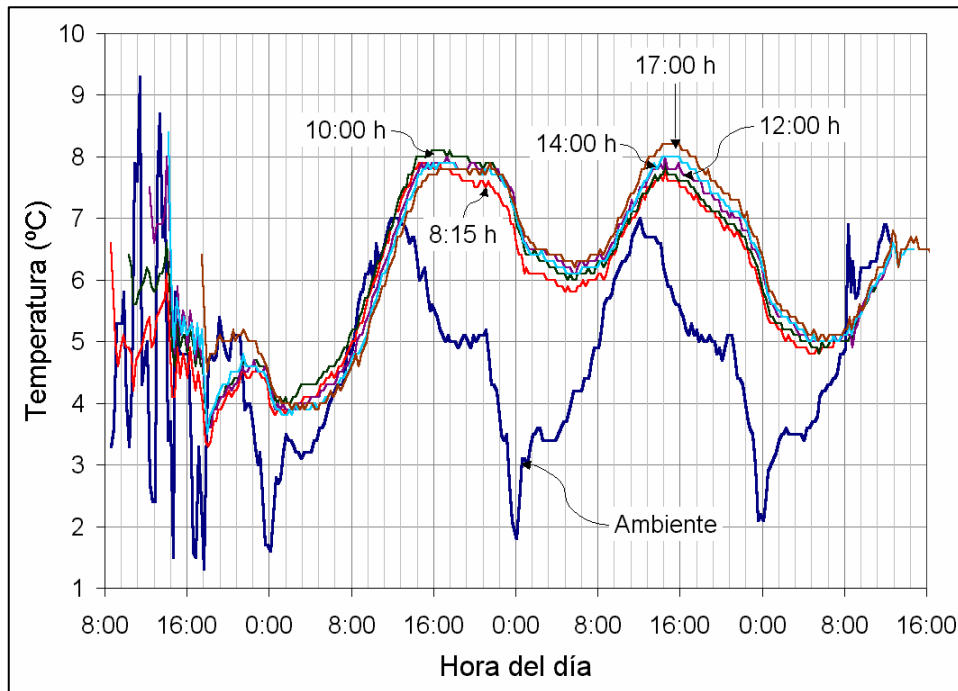


Figura 4.30.- Evolución térmica del hormigón de la serie desmoldeo a 72 horas

De igual forma, en esta serie los registros de la temperatura muestran una gran dispersión térmica en las primeras horas fruto a las condiciones no constantes de la cámara climática. En la [figura 4.31](#) se muestra un mayor detalle de esas horas.

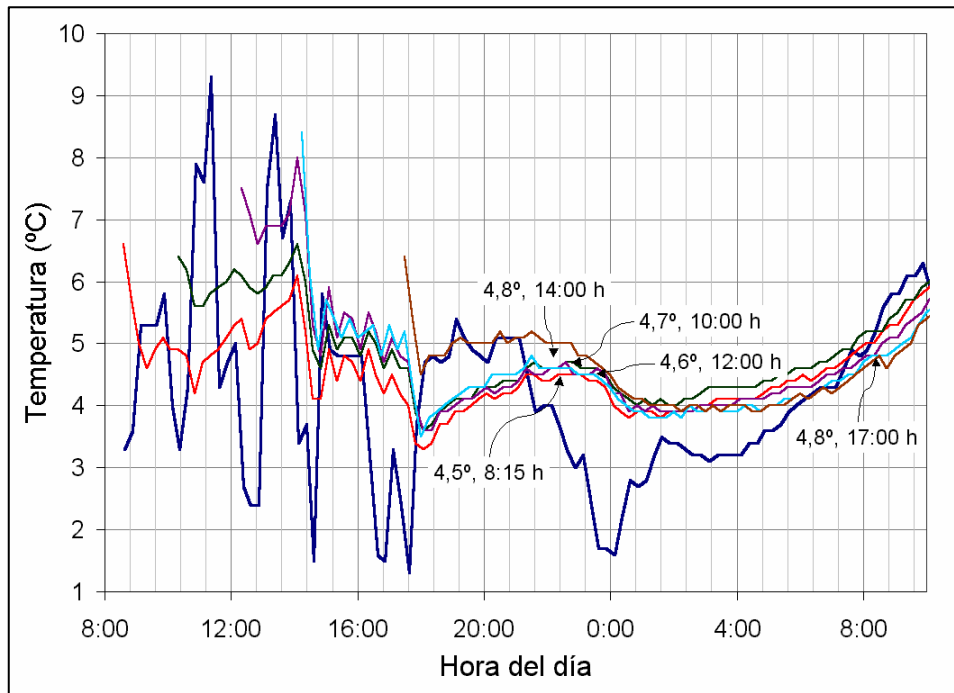


Figura 4.31.- Detalle a primeras edades del hormigón de la serie 72 horas

En la figura anterior puede notarse que la dificultad en las localización de las temperaturas máximas (T_{max}) se hace presente nuevamente, al igual que en las dos series anteriores. A continuación se muestra la **tabla 4.9**, en donde se han obtenido los valores de los parámetros mencionados anteriormente, se incluyen también los resultados de la serie de referencia.

Hora de fabricación	T_i (°C)	T_{max} (°C)	ΔT (°C)	Δt (horas)
Referencia	22,4	24,4	2,0	17,00
8:15 horas	6,6	4,5	-2,1	14,00
10:00 horas	6,4	4,7	-1,7	12,50
12:00 horas	7,5	4,6	-2,9	10,75
14:00 horas	8,4	4,8	-3,6	7,75
17:00 horas	6,4	4,8	-1,6	5,25

Tabla 4.9.- Resultados térmicos, serie 72 horas

De igual forma que para todas las series de condiciones de verano, se muestra a continuación la **figura 4.32** en donde se grafican los valores de ΔT y Δt para cada hora de fabricación.

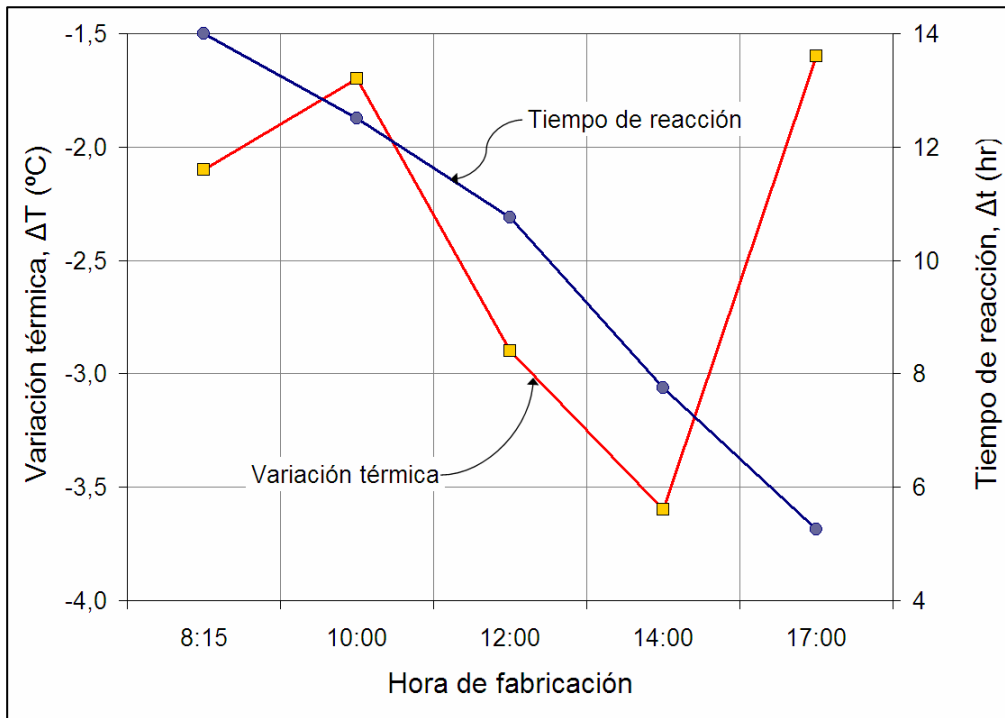


Figura 4.32.- Relaciones entre ΔT y Δt , serie 72 horas

En la figura anterior puede apreciarse que los valores de ΔT nuevamente muestran un comportamiento que no sigue una tendencia clara conforme avanza la hora de fabricación y que es totalmente diferente al observado para los casos de las series anteriores (24 y 48 horas). Por otro lado, los valores de Δt muestran la misma tendencia decreciente conforme avanza la hora del día, esto es aplicable para todas las series.

4.3.5 Promedio de resultados térmicos (invierno)

En los apartados anteriores puede verse que los perfiles térmicos de los hormigones fabricados a cada hora presentan prácticamente el mismo comportamiento en todas las series de desmoldeo, el cual es muy semejante al perfil térmico ambiental. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, la lectura de los parámetros T_i y T_{max} resulta muy difícil y puede llevar a resultados confusos y erróneos. Por otro lado, las temperaturas máximas alcanzadas (T_{max}) en el hormigón bajo estas condiciones son menores que las alcanzadas por el hormigón bajo condiciones de verano, por lo cual, desde el punto de vista de resistencia mecánica, estas menores temperaturas tendrán un efecto positivo.

De acuerdo al tipo de cemento utilizado en estos hormigones, es importante citar que existe una temperatura óptima para las edades tempranas del hormigón, la cual conduce a las más altas resistencias a una edad dada. Para un hormigón elaborado en

laboratorio, utilizando cemento Portland ordinario o modificado, esta temperatura óptima es de aproximadamente 13 °C; para un cemento Portland de rápido endurecimiento es de aproximadamente 4 °C. No obstante, no debe ser olvidado que mas allá del periodo inicial de fraguado y endurecimiento, la influencia de la temperatura (dentro de ciertos límites) tiene efectos que concuerdan con la regla de la madurez: una mayor temperatura acelera el desarrollo de resistencia. [Neville, 1999] En ese sentido, es importante indicar que las temperaturas alcanzadas por el hormigón bajo estas condiciones térmicas son de entre 4 y 13 °C, lo cual resulta en resistencias a compresión mayores. Esta suposición se comprobará más adelante al analizar los resultados de resistencia a compresión de todos los hormigones.

A manera de resumen en la **tabla 4.10** se muestran los resultados térmicos obtenidos del promedio de los parámetros indicados de todas las series, asimismo se indica la desviación estándar y el coeficiente de variación. Cabe mencionar que se han eliminado algunos valores extremos que estaban fuera de rango y que probablemente se debe a errores de medición en la sonda termopar o en el dispositivo (squirrel), el criterio de eliminación correspondió a valores que superaban el 10% de coeficiente de variación. En dicha tabla, ‘ μ ’ es el valor de la media en °C, ‘ σ ’ es el valor de la desviación estándar en °C y ‘C.V.’ es el coeficiente de variación en %.

Parámetro	T _i (°C)			T _{max} (°C)			ΔT (°C)			Δt (horas)		
	μ	σ	C.V.	μ	σ	C.V.	μ	σ	C.V.	μ	σ	C.V.
Serie												
Hora de fabricación												
Referencia	22,4	-	-	24,5	-	-	2,1	-	-	17,00	-	-
8:15 horas	6,6	0,346	5,4%	4,5	0,404	8,5%	-2,1	0,000	0,0%	14,2	0,289	2,0%
10:00 horas	6,4	0,115	1,8%	4,7	0,404	8,2%	-1,7	0,000	0,0%	12,3	0,289	2,3%
12:00 horas	7,5	0,000	0,0%	4,7	0,058	1,2%	-2,8	0,058	-2,0%	10,4	0,289	2,8%
14:00 horas	8,4	0,000	0,0%	4,8	0,289	5,8%	-3,6	0,000	0,0%	8,2	0,382	4,7%
17:00 horas	6,4	0,173	2,7%	4,8	0,289	5,8%	-1,6	0,000	0,0%	5,3	0,250	4,8%

Tabla 4.10.- Promedio de resultados térmicos (invierno)

De igual forma que para cada una de las series, para el resumen anteriormente mostrados se han graficado estos valores y se muestran a continuación en la **figura 4.33**.

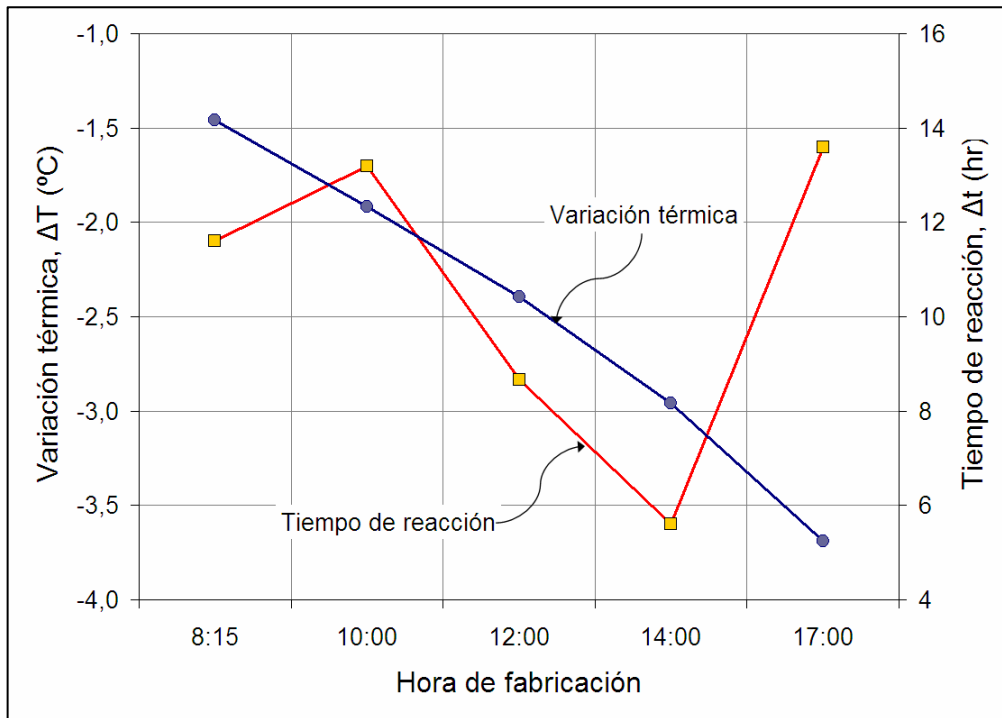


Figura 4.33.- Relaciones entre ΔT y Δt , resumen de todas las series

Puede verse en la gráfica anterior que finalmente, el resumen promedio de los valores de Δt muestra una tendencia claramente decreciente respecto se avanza en la hora de fabricación del hormigón, cabe mencionar que para el caso de estos valores no se suprimió ningún resultado, lo que corrobora la precisión de los datos. No obstante puede verse que para el caso de las variaciones térmicas (ΔT), la tendencia no es uniforme.

4.4 RESULTADOS DE CONSISTENCIA

4.4.1 Condiciones de verano

A continuación, en la **tabla 4.11** se muestran los resultados obtenidos correspondientes a la consistencia o trabajabilidad de cada al hormigón en estado fresco, medida a través del cono de Abrams. De igual forma, dichos resultados se han graficado y se muestran en la **figura 4.34**.

Serie	Hora de fabricación				
	10:00	11:30	13:00	14:30	17:30
Referencia	9,0				
24 horas	3,5	4,0	3,5	5,5	3,5
48 horas	5,0	3,5	5,0	5,5	4,5
72horas	4,5	3,5	3,5	4,0	3,2
Media	4,3	3,7	4,0	5,0	3,7

Tabla 4.11.- Consistencia del hormigón fresco, condiciones de verano (en cm)

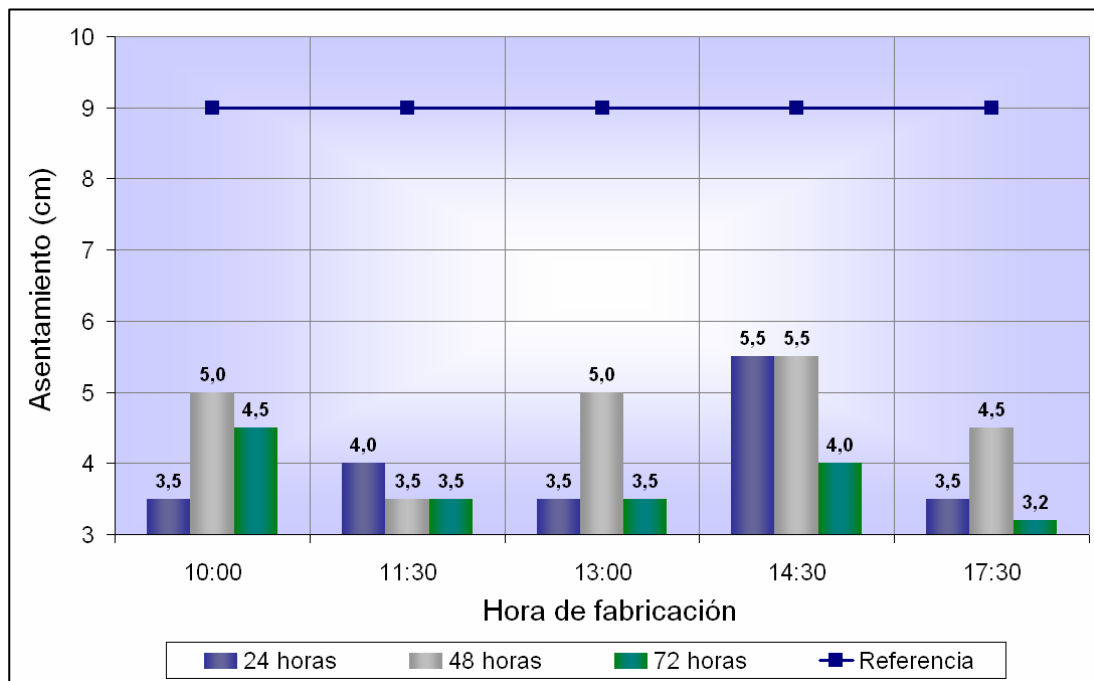


Figura 4.34.- Asentamiento del hormigón, condiciones de verano

En la tabla y figura anteriormente mostradas se observa que la consistencia obtenida para el hormigón de referencia es significativamente mayor que las demás series, obteniéndose los menores resultados para la serie de desmoldeo a 72 horas. El promedio de todas las amasadas es de 4,10 centímetros. Posteriormente se verá el efecto que tiene la temperatura ambiental y del hormigón sobre el asentamiento y, de igual forma, le influencia que tiene la consistencia sobre la resistencia mecánica a compresión.

La disminución del asentamiento de las series respecto a la serie de referencia, a igualdad del resto de parámetros, parece lógico pensar en que es fruto de la mayor temperatura de los áridos, o mejor dicho a la mayor absorción de los áridos. En definitiva, a mayor temperatura, los áridos tienen mayor demanda de agua, por lo que consecuentemente, restarán de la requerida para la homogeneización de la mezcla. Ello se traducirá en una pérdida de la trabajabilidad.

De igual forma, también está presente el fenómeno de la evaporación del agua de amasado del hormigón debido a las altas temperaturas, lo que también tiene consecuencia directa sobre las pérdidas de trabajabilidad.

4.4.2 Condiciones de invierno

A continuación, en la **tabla 4.12** se muestran los resultados obtenidos correspondientes a la consistencia o trabajabilidad de cada al hormigón en estado fresco, medida a través del cono de Abrams. Asimismo se han graficado dichos valores y se muestran en la **figura 4.35**.

Serie	Hora de fabricación				
	10:00	11:30	13:00	14:30	17:30
Referencia	9,0				
24 horas	11,0	10,0	8,0	8,5	11,0
48 horas	8,0	8,0	8,0	7,0	6,5
72horas	7,0	7,5	7,0	6,5	7,5
Media	8,7	8,5	7,7	7,3	8,3

Tabla 4.12.- Consistencia del hormigón fresco, condiciones de invierno (en cm)

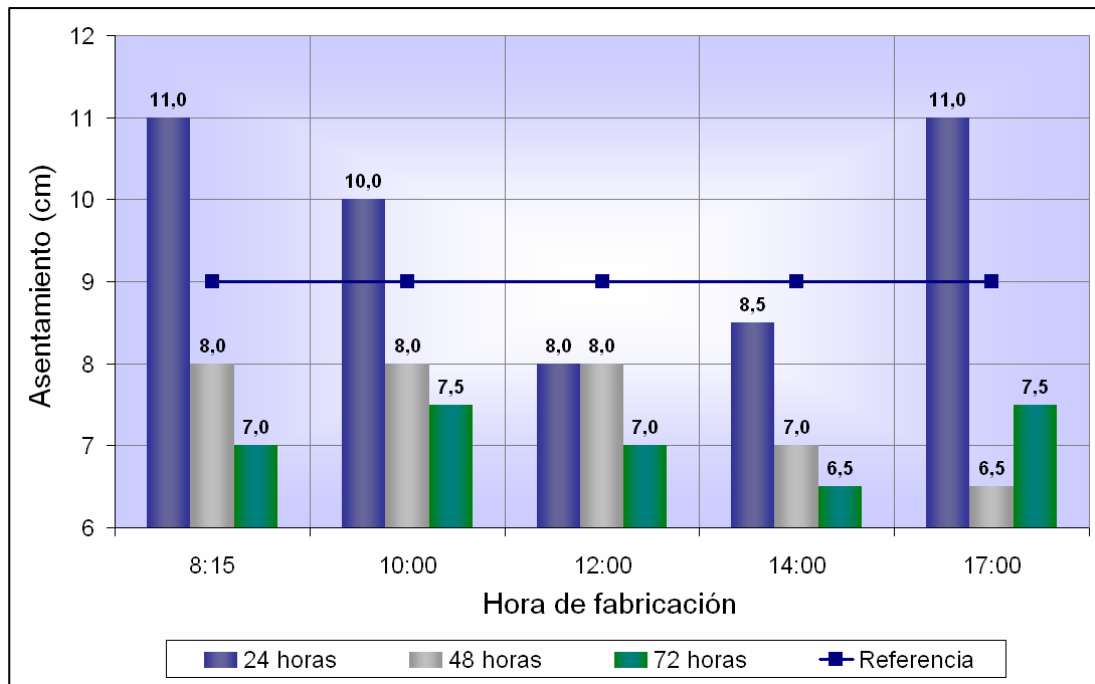


Figura 4.35.- Asentamiento del hormigón, condiciones de invierno

En la tabla y figura anteriormente mostradas puede verse que las mayores consistencias obtenidas son las correspondientes a la serie 24 horas. Por otro lado los valores obtenidos son significativamente mayores que los obtenidos para las condiciones de verano, el promedio de todas las amasadas es de 8,10 centímetros, el cual es muy cercano al de la amasada de referencia. De igual forma posteriormente se verá la influencia que tiene la temperatura ambiental y la del hormigón sobre la consistencia y sobre la resistencia a compresión.

4.5 RESULTADOS MECÁNICOS

En este apartado se presentan y analizan los resultados correspondientes a la resistencia a compresión del hormigón endurecido a 7 y 28 días. Conviene recordar que para estas determinaciones se han elaborado 5 probetas cilíndricas estándar, de las cuales 2 se han ensayado a los 7 días y 3 a los 28 días.

4.5.1 Condiciones de verano

Resistencia a compresión a los 7 días

La **tabla 4.13** muestra las resistencias obtenidas a la edad de 7 días para los hormigones bajo estudio. En ella se muestran los resultados correspondientes a cada probeta en las diferentes horas de fabricación. Asimismo, se dan los valores medios y el coeficiente de variación.

Resistencia a compresión a 7 días (MPa)											
Serie	Datos	Hora de fabricación									
		10:00 hrs		11:30 hrs		13:00 hrs		14:30 hrs		17:30 hrs	
Referencia	Probeta	37,8					37,9				
	Media	37,9									
	C.V.	0,2%									
24 horas	Probeta	35,0	35,2	36,4	34,0	32,6	35,1	38,9	35,3	38,8	38,5
	Media	35,1		35,2		33,9		37,1		38,7	
	C.V.	0,4%		4,8%		5,2%		6,9%		0,5%	
48 horas	Probeta	33,1	33,6	33,3	33,7	34,3	36,9	35,7	36,9	36,2	36,6
	Media	33,4		33,5		35,6		36,3		36,4	
	C.V.	1,1%		0,8%		5,2%		2,3%		0,8%	
72 horas	Probeta	34,8	33,8	34,2	34,9	36,7	35,8	37,7	36,3	37,6	36,1
	Media	34,3		34,6		36,3		37,0		36,9	
	C.V.	2,1%		1,4%		1,8%		2,7%		2,9%	

Tabla 4.13.- Resultado de los ensayos a compresión a los 7 días (MPa)

En primer lugar puede señalarse, que los coeficientes de variación obtenidos son aceptables y, consecuentemente, asumible la fiabilidad de los resultados. Por otro lado se observa, en general (excepto en la serie de 24 horas hormigonada a las 17:30 horas), una disminución de la resistencia en las diferentes series respecto a la serie de referencia.

Asimismo puede apreciarse que la serie de 48 horas conduce a menores resultados que la serie de 72 horas, este resultado es difícil de explicar, por lo que habrá que mantener especial atención por si se repite de forma sistemática en series posteriores de ensayo. En el momento actual, a la luz de las pequeñas variaciones existentes podría justificarse por razones de tipo experimental (horas reales transcurridas, etc).

Para visualizar mejor estos resultados, en la **figura 4.36** se presentan los mismos de forma gráfica. En ella puede verse, que los resultados muestran una tendencia creciente a medida que avanza la hora de hormigonado, obteniéndose los mayores valores de las resistencias, para la serie hormigonada a las 17:30 (con disminuciones menores al 3% respecto a los resultados de la serie de referencia). Este resultado es sumamente interesante cara a las implicaciones industriales del mismo.

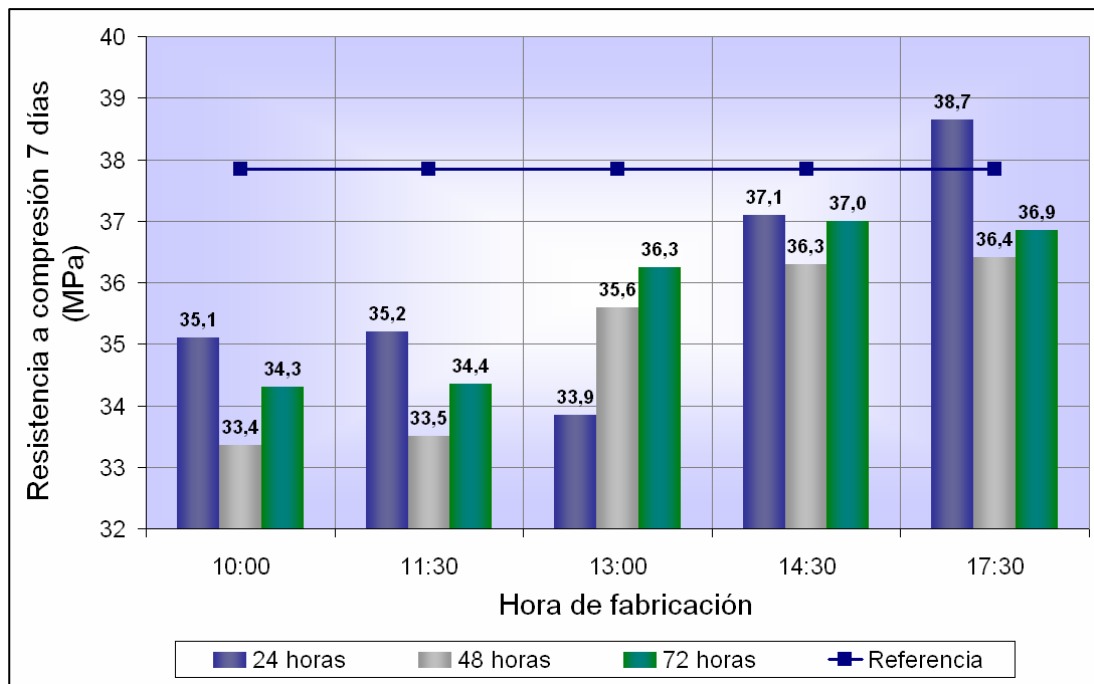


Figura 4.36.- Resultado de los ensayos a compresión a los 7 días (MPa)

Si recordamos, que las series hormigonadas a las 17:30 horas conducían, por otro lado, a cinéticas de reacción más lentas y con menor incremento de temperaturas, podemos concluir que este es un factor principal desde el punto de vista resistente. Las

series hormigonadas a las 14:30 también muestran esa tendencia, teniendo mayor variación.

De todo ello se podría concluir que, en verano, interesa hormigonar por la tarde, lo que rompe cierta creencia extendida de que debería hacerse a primera hora de la mañana. Hay que resaltar, por otro lado, que esto responde a resultados en probetas y, que en elementos estructurales, con mayores espesores, lo que dificulta la disipación de temperaturas, podríamos encontrarnos con valores más similares a las series de mayor gradiente térmico.

Resistencia a compresión a los 28 días

La **tabla 4.14** muestra las resistencias obtenidas a la edad de 28 días para los hormigones bajo estudio. En ella se muestran los resultados correspondientes a cada probeta en las diferentes horas de fabricación. Asimismo, se dan los valores medios y el coeficiente de variación.

Resistencia a compresión a 28 días (MPa)																
Serie	Datos	Hora de fabricación														
		10:00 hrs			11:30 hrs			13:00 hrs			14:30 hrs			17:30 hrs		
Referencia	Probeta	41,9			36,1*			44,7								
	Media	43,3														
	C.V.	4,6%														
24 horas	Probeta	44,4	42,1	43,3	41,0	43,3	41,4	42,2	41,5	40,5	43,0	42,3	40,3	45,6	44,2	47,1
	Media	43,3			41,9			41,4			41,9			45,6		
	C.V.	2,7%			2,9%			2,1%			3,3%			3,2%		
48 horas	Probeta	37,6	39,1	39,9	40,2	39,5	40,6	42,1	42,4	43,7	41,5	41,7	42,3	42,3	40,4	39,5
	Media	38,9			40,1			42,7			41,8			40,7		
	C.V.	3,0%			1,4%			2,0%			1,0%			3,5%		
72 horas	Probeta	40,4	40,1	41,1	42,5	40,9	40,1	42,3	39,7	42,6	43,1	38,7	40,3	41,9	38,6	43,2
	Media	40,5			41,2			41,5			40,7			41,2		
	C.V.	1,3%			3,0%			3,8%			5,5%			5,8%		

Tabla 4.14.- Resultado de los ensayos a compresión a los 28 días (MPa)

En primer lugar, al igual que en la edad de 7 días, puede señalarse que los coeficientes de variación obtenidos son aceptables y, consecuentemente, asumible la fiabilidad de los resultados. El resultado correspondiente a la segunda probeta de la serie de referencia es anormalmente bajo, por lo que se ha despreciado para el cálculo de la media. Asimismo y, al igual que en la edad de 7 días, se observa, en general (excepto en la serie de 24 horas hormigonada a las 17:30 horas), una disminución de la resistencia

en las diferentes series respecto a la serie de referencia. Para visualizar mejor estos resultados, en la **figura 4.37** se presentan los mismos de forma gráfica.

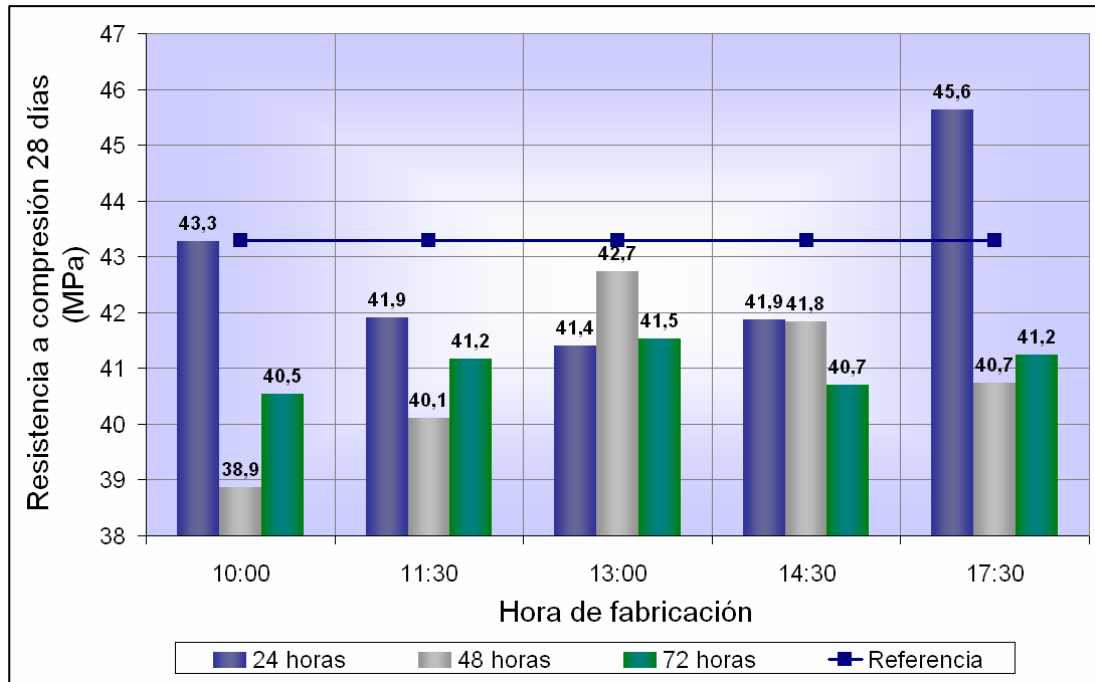


Figura 4.37.- Resultado de los ensayos a compresión a los 28 días (MPa)

En esta figura puede apreciarse, asimismo, una cierta tendencia de mayores resistencias, a medida que las amasadas avanzan en el día, si bien aquí su efecto queda laminado con respecto al obtenido para los 7 días. En cualquier caso, el ciclo de temperatura incide de forma negativa en las resistencias, con relación a las obtenidas en la serie patrón.

Resumen y promedio de resultados mecánicos (verano)

A continuación se muestra el resumen de los resultados de consistencia y mecánicos para todas las horas de fabricación de las condiciones de verano, en la **tabla 4.15**.

Resumen de resultados (condiciones de verano)							
Serie	Propiedad	Unidad	Hora de fabricación				
			10:00	11:30	13:00	14:30	17:30
Referencia	Asentamiento	cm	9,0				
	fcm 7 días	MPa	37,9				
	fcm 28 días	MPa	43,3				
24 horas	Asentamiento	cm	3,5	4,0	3,5	5,5	3,5
	fcm 7 días	MPa	35,1	35,2	33,9	37,1	38,7
	fcm 28 días	MPa	43,3	41,9	41,4	41,9	45,6
48 horas	Asentamiento	cm	5,0	3,5	5,0	5,5	4,5
	fcm 7 días	MPa	33,4	33,5	35,6	36,3	36,4
	fcm 28 días	MPa	38,9	40,1	42,7	41,8	40,7
72 horas	Asentamiento	cm	4,5	3,5	3,5	4,0	3,2
	fcm 7 días	MPa	34,3	34,6	36,3	37,0	36,9
	fcm 28 días	MPa	40,5	41,2	41,5	40,7	41,2

Tabla 4.15.- Resumen de resultados (condiciones de verano)

De igual forma que se hizo con los resultados térmicos, para el caso de los resultados de consistencia y de compresión, se realizó un promedio para cada hora de fabricación. Este promedio se hizo partiendo del hecho de que no existen diferencias significativas entre cada edad de desmoldeo, de hecho los coeficientes de variación mostrados entre paréntesis (en porcentaje) así lo demuestran. A continuación se muestran dichos promedios calculados en la **tabla 4.16**, con su respectivo coeficiente de variación.

Condiciones de verano			
Hora de fabricación	Asentamiento (cm)	Resistencia a compresión (MPa)	
		7 días	28 días
Referencia	9,0	37,9	43,3
10:00	4,8 (7,4)	34,3 (2,6)	40,9 (5,4)
11:30	3,5 (0,0)	34,4 (2,5)	41,1 (2,2)
13:00	3,5 (0,0)	35,2 (3,5)	41,9 (1,8)
14:30	5,5 (0,0)	36,8 (1,2)	41,5 (1,6)
17:30	3,4 (6,3)	37,3 (3,2)	42,5 (6,3)

Tabla 4.16.- Promedio de resultados (condiciones de verano)

Con objeto de ver de una forma más ilustrativa los resultados anteriormente mostrados, se han graficado estos valores y se muestran a continuación en la **figura 4.38**. En dicha gráfica, el eje izquierdo de las ordenadas corresponde a la resistencia y el izquierdo al asentamiento.

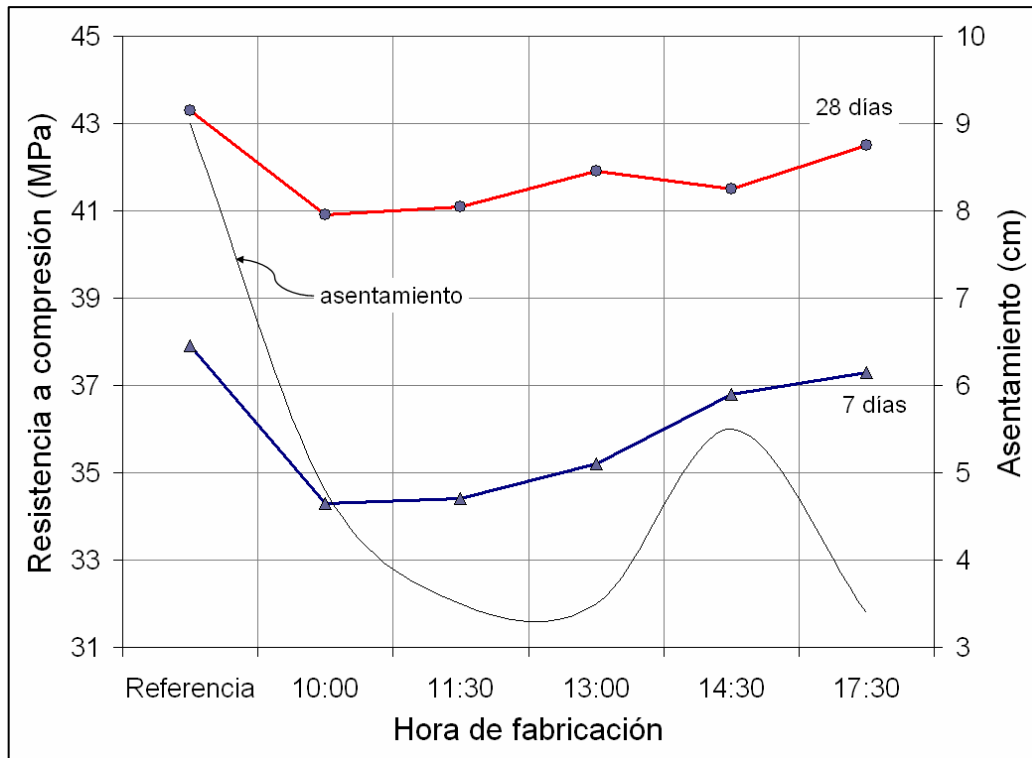


Figura 4.38.- Promedio de resultados (condiciones de verano)

En la tabla y figura anteriores podemos ver primeramente que la resistencia a compresión alcanzada por el hormigón de referencia es mayor a todos los demás hormigones. De igual forma se observa la tendencia creciente de la resistencia conforme se avanza en la hora de hormigonado, lo anterior tanto para los 7 días como para los 28 días de edad. En este caso el asentamiento parece no tener influencia en los valores de resistencia a compresión, sin embargo, se nota la influencia de la temperatura en este factor, ya que los valores obtenidos son mucho menores que el obtenido para el hormigón de referencia.

4.5.2 Condiciones de invierno

Resistencia a compresión a los 7 días

La **tabla 4.17** muestra las resistencias obtenidas a la edad de 7 días para los hormigones bajo estudio. En ella se muestran los resultados correspondientes a cada

probeta en las diferentes horas de fabricación. Asimismo, se dan los valores medios y el coeficiente de variación. Por otro lado cabe mencionar que en la serie de 48 horas, la amasada fabricada a las 8:15 horas se obtuvo una resistencia muy baja en una de las probetas respecto a su pareja, por lo que éste resultado se eliminó y se tomó el resultado de la otra probeta.

Resistencia a compresión a 7 días (MPa)											
Serie	Datos	Hora de fabricación									
		8:15 hrs		10:00 hrs		12:00 hrs		14:00 hrs		17:00 hrs	
Referencia	Probeta	37,8					37,9				
	Media	37,9									
	C.V.	0,2%									
24 horas	Probeta	42,60	40,20	39,60	40,90	40,00	42,60	42,10	41,50	42,70	39,10
	Media	41,4		40,3		41,3		41,8		40,9	
	C.V.	4,1%		2,3%		4,5%		1,0%		6,2%	
48 horas	Probeta	26,6*	42,20	44,50	43,10	41,50	43,30	41,20	41,30	41,10	42,90
	Media	42,2		43,8		42,4		41,3		42,0	
	C.V.	0,0%		2,3%		3,0%		0,2%		3,0%	
72 horas	Probeta	42,10	41,50	41,60	40,40	41,70	40,30	38,30	38,10	37,20	40,70
	Media	41,8		41,0		41,0		38,2		39,0	
	C.V.	1,0%		2,1%		2,4%		0,4%		6,4%	

Tabla 4.17.- Resultado de los ensayos a compresión a los 7 días (MPa)

De los resultados obtenidos puede señalarse, en primer lugar, que los coeficientes de variación son aceptables y, consecuentemente, asumible la fiabilidad de los resultados. Por otro lado se observa, en general, un aumento de la resistencia en las diferentes series respecto a la serie de referencia. Este hecho tiene especial relevancia ya que se observa que las temperaturas ambiente bajas ejercen un efecto favorable sobre la resistencia del hormigón a edades tempranas.

Aunque los resultados no permiten ver tendencias claras, parece observarse que las resistencias disminuyen a medida que avanza la hora de hormigonado que, como se ha indicado con anterioridad, implican cinéticas más rápidas de reacción y consecuentemente cristales menores y menos resistentes (menor reticulación). Hay que tener presente que este resultado es coincidente con las condiciones de verano, en el que las resistencias más altas se daban con las cinéticas más lentas, que en aquel caso responden a los hormigonados de la tarde.

Por otro lado, la edad de desmoldeo no muestra una tendencia clara con relación a los resultados, tal y como sucedía en las series correspondientes a la simulación de las condiciones de verano. Para visualizar mejor los resultados dados en la tabla anterior, en la **figura 4.39**, se presentan los mismos de forma gráfica.

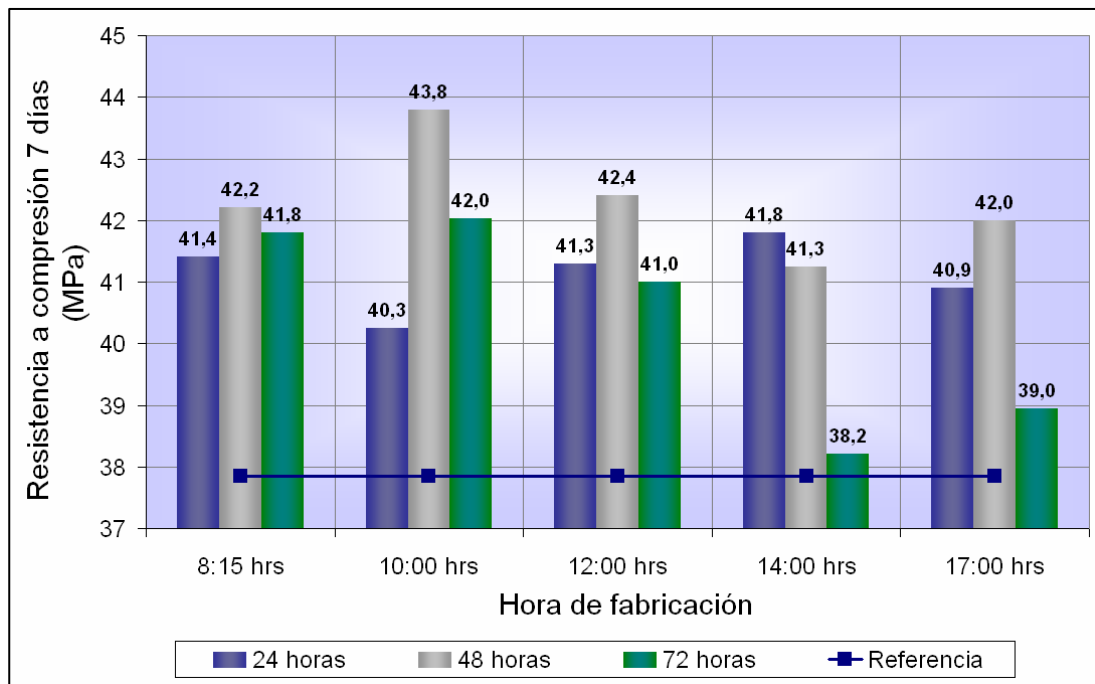


Figura 4.39.- Resultado de los ensayos a compresión a los 7 días (MPa)

En esta figura puede apreciarse algo esa tendencia a disminuir las resistencias a medida que avanza la hora de hormigonado (justo en sentido contrario que lo hace en verano). Asimismo puede verse que las resistencias, en las condiciones de invierno, están en el entorno de un 10% por encima de las correspondientes a las probetas patrón realizadas a 20 °C.

Resistencia a compresión a los 28 días

La **tabla 4.18** muestra las resistencias obtenidas a la edad de 28 días para los hormigones bajo estudio. En ella se muestran los resultados correspondientes a cada probeta en las diferentes horas de fabricación. Asimismo, se dan los valores medios y el coeficiente de variación. En ella puede verse que el resultado correspondiente a la segunda probeta de la serie de referencia es anormalmente bajo, por lo que se ha despreciado para el cálculo de la media, (este mismo planteamiento se ha realizado para las condiciones de verano).

Resistencia a compresión a 28 días (MPa)																
Serie	Datos	Hora de fabricación														
		8:15 hrs			10:00 hrs			12:00 hrs			14:00 hrs			17:00 hrs		
Referencia	Probeta	41,9			36,1*			44,7								
	Media	43,3														
	C.V.	4,6%														
24 horas	Probeta	46,0	46,2	44,6	45,8	45,3	46,4	42,2	43,9	45,2	45,7	45,2	45,2	46,6	42,5	44,7
	Media	45,6			45,8			43,8			45,4			44,6		
	C.V.	1,9%			1,2%			3,4%			0,6%			4,6%		
48 horas	Probeta	45,4	44,1	44,5	46,8	44,5	45,9	47,7	46,4	47,1	49,6	45,3	48,6	45,8	46,1	49,2
	Media	44,7			45,7			47,1			47,8			47,0		
	C.V.	1,5%			2,5%			1,4%			4,7%			4,0%		
72 horas	Probeta	47,5	47,3	46,9	45,3	45,3	46,2	45,1	45,9	45,9	45,8	47,0	47,9	45,7	44,9	48,1
	Media	47,2			45,6			45,6			46,9			46,2		
	C.V.	0,6%			1,1%			1,0%			2,2%			3,6%		

Tabla 4.18.- Resultado de los ensayos a compresión a los 28 días (MPa)

En primer lugar, al igual que en la edad de 7 días, puede señalarse que los coeficientes de variación obtenidos son aceptables y, consecuentemente, asumible la fiabilidad de los resultados.

Asimismo y, al igual que en la edad de 7 días, se observa, en general un aumento de la resistencia en las diferentes series respecto a la serie de referencia. Para visualizar mejor estos resultados, en la **figura 4.40** se presentan los mismos de forma gráfica. De igual forma que en los resultados de resistencia a compresión a la edad de 7 días, no se observa un patrón uniforme en los resultados a 28 días, sin embargo a partir de las 12:00 hrs. se nota una tendencia uniforme en los resultados en los cuales las resistencias mayores corresponden a la serie de desencofrado de 48 horas, posteriormente los correspondientes a la serie de 72 horas y por último los de la serie de 24 horas.

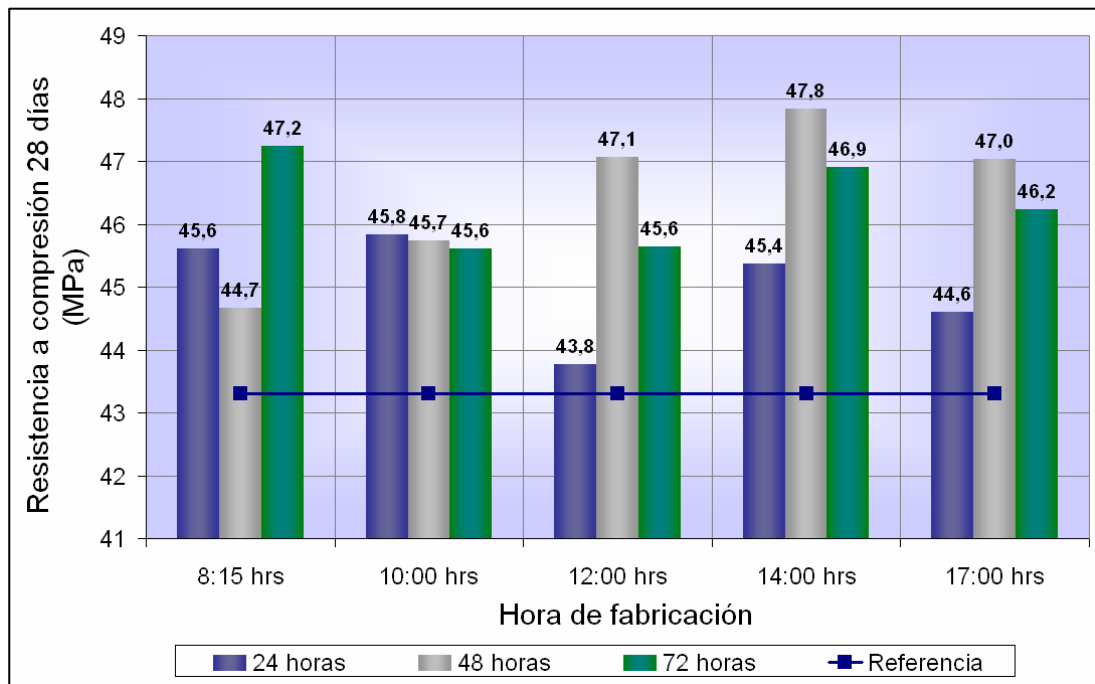


Figura 4.40.- Resultado de los ensayos a compresión a los 28 días (MPa)

Resumen y promedio de resultados mecánicos (invierno)

A continuación se muestra el resumen de los resultados de consistencia y mecánicos para todas las horas de fabricación de las condiciones de invierno, en la [tabla 4.19](#).

Resumen de resultados (condiciones de invierno)							
Serie	Propiedad	Unidad	Hora de fabricación				
			8:15	10:00	12:00	14:00	17:00
Referencia	Asentamiento	cm	9,0				
	fcm 7 días	MPa	37,9				
	fcm 28 días	MPa	43,3				
24 horas	Asentamiento	cm	11,0	10,0	8,0	8,5	11,0
	fcm 7 días	MPa	41,4	40,3	41,3	41,8	40,9
	fcm 28 días	MPa	45,6	45,8	43,8	45,4	44,6
48 horas	Asentamiento	cm	8,0	8,0	8,0	7,0	6,5
	fcm 7 días	MPa	42,2	43,8	42,4	41,3	42,0
	fcm 28 días	MPa	44,7	45,7	47,1	47,8	47,0
72 horas	Asentamiento	cm	7,0	7,5	7,0	6,5	7,5
	fcm 7 días	MPa	41,8	41,0	41,0	38,2	39,0
	fcm 28 días	MPa	47,2	45,6	45,6	46,9	46,2

Tabla 4.19.- Resumen de resultados (condiciones de invierno)

Al igual que con las condiciones de verano, se muestra a continuación el promedio de los resultados de consistencia y compresión, para cada hora de fabricación. De igual forma, se muestran los coeficientes de variación entre paréntesis (en porcentaje), los cuales tienen valores muy adecuados. A continuación se muestran dichos promedios en la [tabla 4.20](#).

Condiciones de invierno			
Hora de fabricación	Asentamiento (cm)	Resistencia a compresión (MPa)	
		7 días	28 días
Referencia	9,0	37,9	43,3
8:15	7,5 (9,4)	41,8 (1,0)	45,8 (2,8)
10:00	7,8 (4,6)	41,7 (4,5)	45,7 (0,3)
12:00	7,7 (7,5)	41,6 (1,8)	45,5 (3,6)
14:00	6,8 (5,2)	40,4 (4,8)	46,7 (2,7)
17:00	7,0 (10,1)	40,6 (3,8)	46,0 (2,7)

Tabla 4.20.- Promedio de resultados (condiciones de invierno)

Con objeto de ver de una forma más ilustrativa los resultados anteriormente mostrados, se han graficado estos valores y se muestran a continuación en la **figura 4.41**. En dicha gráfica, el eje izquierdo de las ordenadas corresponde a la resistencia y el izquierdo al asentamiento.

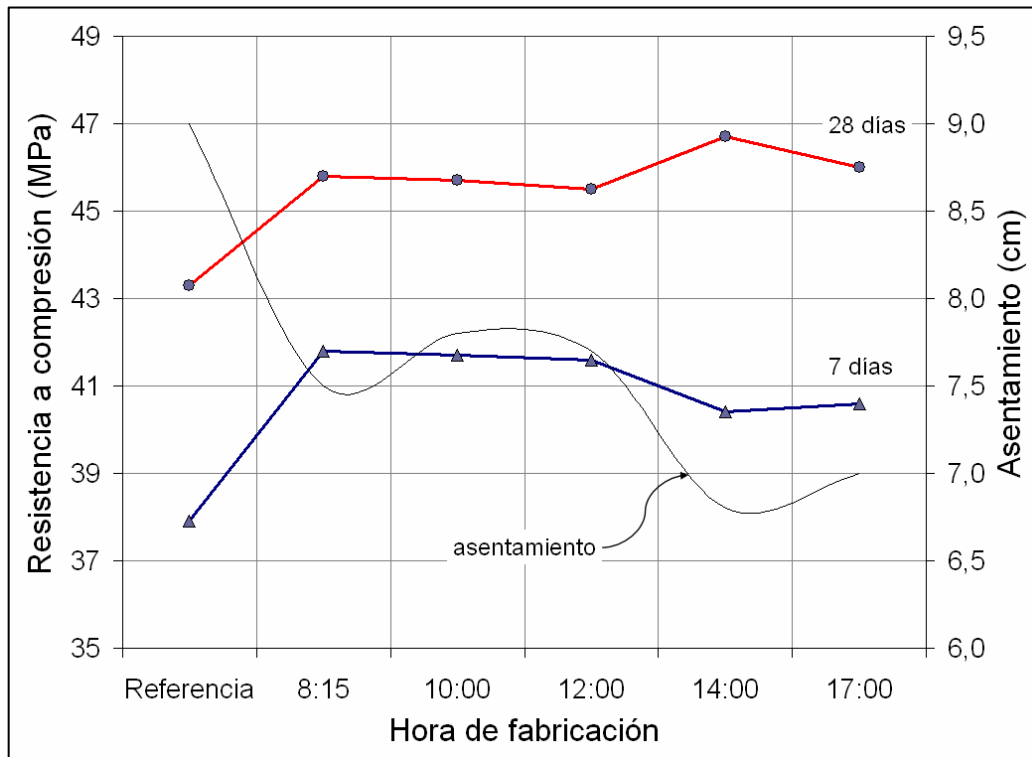


Figura 4.41.- Promedio de resultados (condiciones de invierno)

Podemos ver en la tabla y figura anteriormente mostradas que la resistencia a compresión alcanzada por el hormigón de referencia, en este caso, es menor que las alcanzadas por los demás hormigones sometidos a temperaturas menores de 20 °C. Por otro lado, la variación en la resistencia entre cada hora de fabricación no es muy significativa, notándose cierta tendencia en el sentido de aumentar la resistencia a primeras horas del día, este hecho es más marcado a la edad de 7 días. De igual forma que para la serie de verano, en este caso la consistencia parece no tener influencia sobre los resultados de resistencia a compresión del hormigón. Por otro lado, los valores de asentamiento, son menores nuevamente que los del hormigón de referencia, pero son mayores que los obtenidos para las condiciones de verano.

4.6 ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE AMBAS CONDICIONES

4.6.1 Resultados térmicos

A continuación se muestra la **figura 4.42**, en donde se han graficado conjuntamente los valores de las variaciones térmicas de ambas condiciones climáticas estudiadas, para cada hora de fabricación.

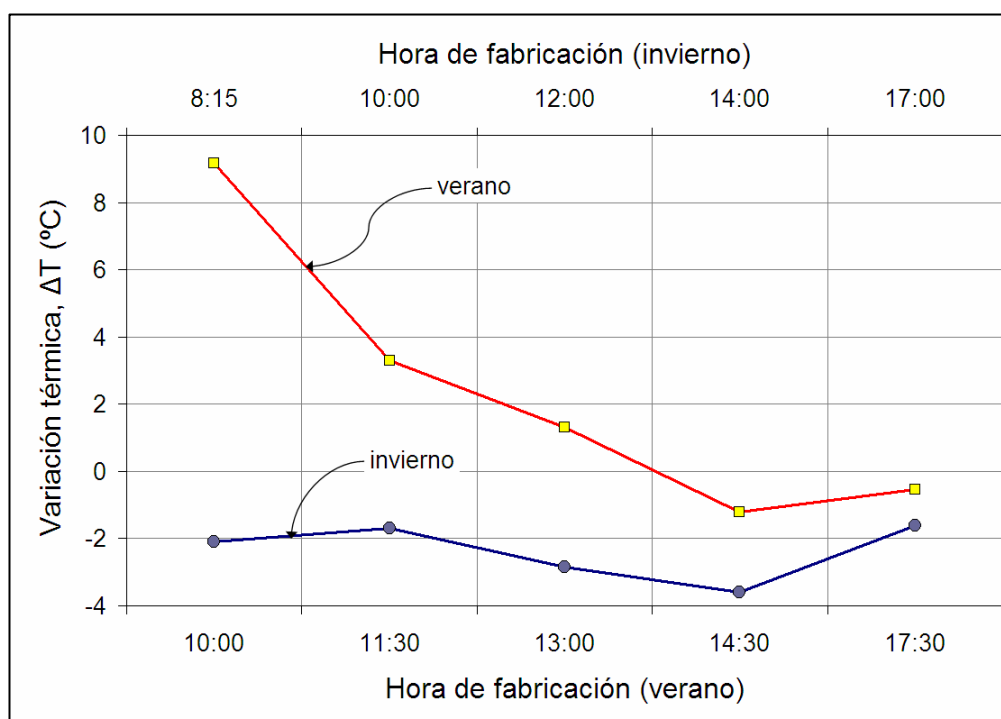


Figura 4.42.- Variaciones térmicas (ΔT) para ambas condiciones

Podemos ver en la figura anterior que para el caso de las condiciones de verano el comportamiento de los valores de las variaciones térmicas (ΔT) sigue una clara tendencia decreciente, la cual anteriormente fue analizada, conforme se avanza en la hora del día. Por otro lado para el caso de las condiciones de invierno podría decirse que la tendencia es horizontal, es decir, que no existe variación alguna entre cada hora de fabricación. Este aspecto fue comentado anteriormente a lo largo del **apartado 4.3**.

Ahora, se presenta la **figura 4.43**, en la cual se han graficado, de igual forma, conjuntamente los valores de los tiempos de reacción.

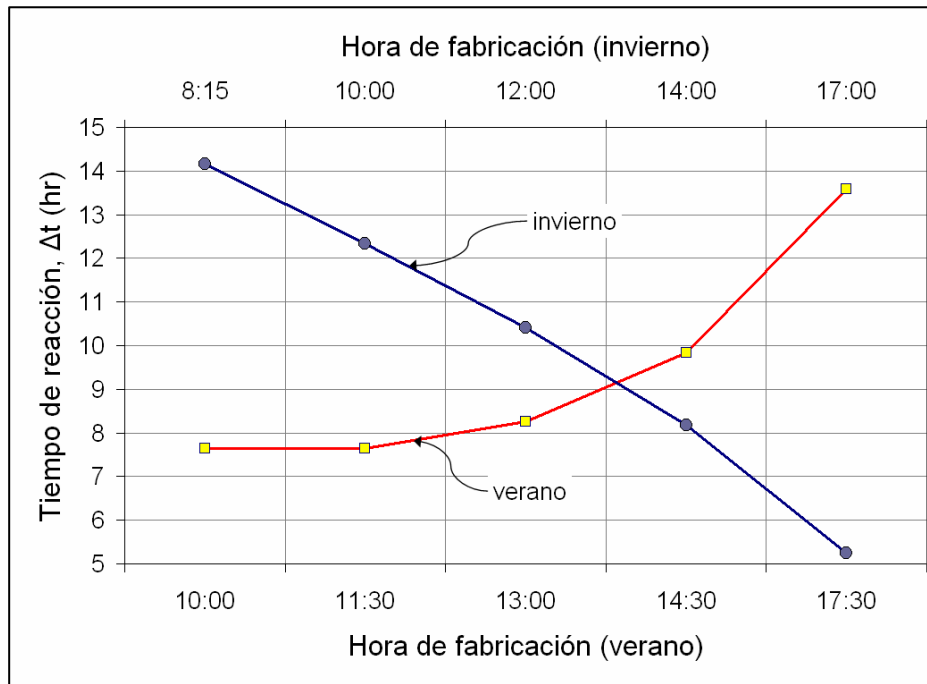


Figura 4.43.- Tiempos de reacción (Δt) para ambas condiciones

En la figura anterior, puede verse un notado efecto cruzado entre ambas condiciones climáticas, notándose una tendencia casi lineal para el caso de las condiciones de invierno y para el caso de las condiciones de verano, una tendencia creciente pero de forma exponencial. Para el caso de esta figura podemos concluir que en verano es conveniente hormigonar a últimas horas de la tarde y, por el contrario, para el caso de invierno es más conveniente hormigonar a primeras horas de la mañana.

4.6.2 Resultados de consistencia y mecánicos

Con el objeto de visualizar la dispersión interna de cada serie de hormigonado, se realizó la determinación de la varianza poblacional a través de la media ponderada de todas las varianzas de las muestras. En este sentido, la desviación estándar poblacional se calcula por medio de la siguiente ecuación: [Prat et al., 1997]

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (n_i - 1) \cdot s_i^2}{\sum_{i=1}^k (n_i - 1)}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (n_i - 1) \cdot s_i^2}{N - k}}$$

donde:

s = desviación estándar poblacional
 k = número de series a ser comparadas
 n_i = número de datos disponibles para la serie i
 s_i^2 = varianza de los datos correspondientes a la serie i
 N = número de datos en las k series

El tamaño de la muestra no es lo suficientemente grande como para utilizar una distribución de frecuencia ‘normal’, por lo tanto se utilizó una distribución tipo ‘t-Student’ para calcular el factor de escala de acuerdo a los grados de libertad, con un intervalo de confianza estadístico del 90%. Los valores de la desviación estándar para los valores de resistencia a compresión (para ambas condiciones climáticas), a 7 y 28 días, correspondientemente, son los siguientes (en MPa): 1,001 y 0,970 para el hormigón de referencia; 0,869 y 1,044 para las condiciones de verano; 1,175 y 0,847 para las condiciones de invierno.

Resistencia a compresión a los 7 días

En la **figura 4.44** se muestra la resistencia a compresión a la edad de 7 días para todas las horas de fabricación de ambas condiciones climáticas. Asimismo se graficaron conjuntamente los valores del asentamiento, también para las dos condiciones. Esta figura se muestra a continuación. En este caso, los valores obtenidos para el hormigón de referencia fueron los siguientes: asentamiento = 9,0 cm y resistencia a compresión (28 días) = 37,9 MPa.

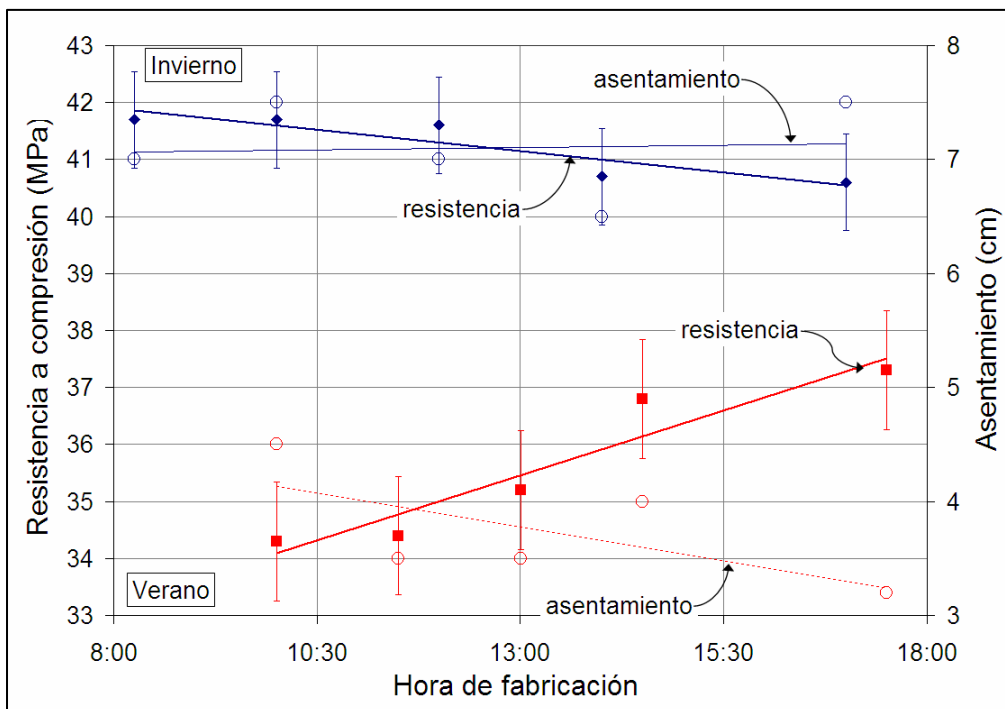


Figura 4.44.- Resistencia a compresión (7 días) y asentamiento

En la figura anterior se presentan los resultados de resistencia con sus respectivas barras de error y un ajuste lineal, asimismo los resultados de asentamiento están marcados por círculos vacíos y también están ajustados linealmente. En los resultados, podemos ver que la magnitud de los valores de resistencia a compresión es mayor en invierno que en verano, teniendo como punto intermedio el hormigón de referencia. También se observan las tendencias crecientes y decrecientes en la resistencia a compresión, para las condiciones de verano y de invierno, respectivamente. En esta gráfica, el asentamiento, como se mencionó anteriormente, no tiene influencia en la resistencia.

Resistencia a compresión a los 28 días

En la **figura 4.45** se muestra la resistencia a compresión a la edad de 28 días para todas las horas de fabricación de ambas condiciones climáticas. Asimismo se graficaron conjuntamente los valores del asentamiento, también para las dos condiciones. Esta figura se muestra a continuación. En este caso, los valores obtenidos para el hormigón de referencia fueron los siguientes: asentamiento = 9,0 cm y resistencia a compresión (28 días) = 43,3 MPa.

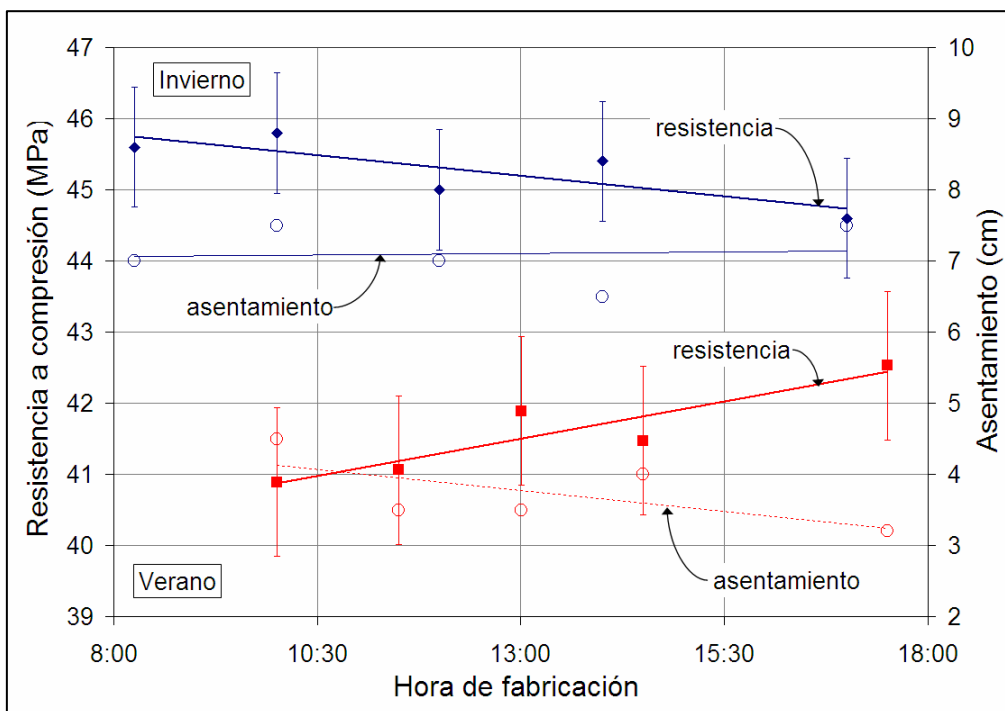


Figura 4.45.- Resistencia a compresión (28 días) y asentamiento

En la figura anterior pueden hacerse los mismos comentarios hechos para la edad de 7 días. Sin embargo, las tendencias en esta edad del hormigón, son algo menos marcadas que a 7 días.

4.7 DISCUSIÓN

Como puede verse en la información mostrada anteriormente, es notable la influencia de la temperatura ambiental en la trabajabilidad del hormigón fresco, teniendo la situación más desfavorable para las condiciones de verano, en la cual los valores del asentamiento son muy bajos. Para el caso de las condiciones de invierno, los valores del asentamiento son algo mayores, pero en ningún caso, dichos valores son similares al obtenido en el hormigón de referencia.

Por otro lado, es evidente que los valores de resistencia a compresión obtenidos bajo las condiciones de invierno son mayores que los de verano, de hecho, los valores obtenidos a los 7 días de edad bajo condiciones de invierno son casi iguales a los obtenidos a los 28 días de edad para condiciones de verano. Adicionalmente, puede ser visto que para una condición climática particular, el valor del asentamiento no tiene un efecto importante sobre la resistencia a compresión del hormigón. Por el contrario, los factores más importantes son la temperatura del hormigón y la temperatura ambiente y, asimismo, el gradiente entre estas temperaturas, principalmente durante las primeras horas del hormigón.

[Mouret et al., 1997], encontraron que la cantidad de agua requerida para producir una consistencia dada aumenta generalmente con el incremento de la temperatura de los áridos, además observaron cierta evaporación de agua de amasado durante la colocación y el curado del hormigón. Además, observan, la cantidad extra de agua necesaria, debida a una mayor temperatura de los áridos, no es la razón principal de las pérdidas de resistencia del hormigón. Cabe mencionar que en este trabajo no se añadió agua adicional en el hormigón durante el amasado, usando siempre la misma cantidad considerada inicialmente, debido a esto, se observaron tales pérdidas de trabajabilidad.

Estos autores argumentan que otra explicación tiene que ser investigada en la microestructura del hormigón, es decir, estudiar el efecto de la temperatura de los áridos en la naturaleza, la morfología y la distribución de los productos de hidratación en la matriz interna y en el espacio entre los granos de cemento. En este respecto, el contenido de los granos de cemento no-hidratado podría brindar más información acerca del estado de hidratación del hormigón, así como la evaluación del agua combinada.

De igual forma, estos autores en otra investigación [Mouret et al., 2003], afirman que un incremento en la temperatura inicial del hormigón trae como consecuencia un aumento en el contenido de aire del mismo, ya que los áridos generan burbujas de aire cuando están calientes y entran en contacto con el agua de amasado; por lo tanto, se produce un incremento significativo de vacíos. Lo anterior confirma la necesidad de rociar los áridos inmediatamente antes de su utilización para fabricar hormigón, no solamente para producir un efecto de enfriamiento, sino también para evitar la generación de vacíos en el hormigón.

Por otro lado, estudios previos han mostrado un cambio en la microestructura de la interfase pasta-árido en especímenes de hormigón fabricados en verano y en modelos pasta-árido; particularmente, cuanto mayor es la temperatura del cemento y/o del árido, mayor es la concentración de hidróxido de calcio (CH) en la interfase. Esta observación nos lleva a asumir que la zona de transición es debilitada por un fenómeno químico debido al incremento de la temperatura de los constituyentes. Los autores encontraron que una temperatura elevada de los áridos tiene los mismos efectos que una temperatura elevada de curado sobre el desarrollo de resistencia del hormigón. Debido a que la mayor parte del hormigón la constituyen los áridos, un incremento en la temperatura de estos produce un gran incremento en la temperatura del hormigón. [Mouret et al., 1997]

Otro hecho de importancia que vale la pena mencionar es la tendencia revertida entre las condiciones de verano y las condiciones de invierno en el sentido de que los mayores valores de resistencia a compresión bajo condiciones de verano, corresponden a aquellos hormigones que se fabricaron a últimas horas del día. Por el contrario, para el caso de las condiciones de invierno, esta tendencia es inversa; es decir, los mayores valores de resistencia a compresión se obtienen en los hormigones que fueron fabricados en las primeras horas del día. Esta tendencia es más marcada a la edad de 7 días. En comparación con los valores de resistencia del hormigón de referencia, podemos decir que todos los resultados obtenidos bajo condiciones de verano son menores que este y, al mismo tiempo, que todos los resultados obtenidos bajo condiciones de invierno son mayores. Es posible relacionar esta observación con el llamado “efecto cruzado” (crossover effect), referido por [Alexander y Taplin, 1962], del cual dicen lo siguiente: el hormigón sujeto a una alta temperatura a una edad temprana, alcanza una mayor resistencia a compresión a edad temprana, pero una menor resistencia a edades posteriores.

Los efectos de la temperatura de curado en la hidratación y el desarrollo de resistencia en el hormigón son fenómenos todavía no muy bien conocidos. La rápida hidratación debida a temperaturas elevadas se considera que actúa como un “cascarón” que finalmente impide la difusión de los productos de hidratación dentro del volumen de la matriz cementante. Se ha reportado también que la porosidad de la pasta de cemento se incrementa como resultado de una difusión no-uniforme de los productos de hidratación. También, otro efecto similar puede ocurrir si la temperatura es incrementada muy rápidamente durante las primeras edades del hormigón, esto puede ocasionar tensiones internas que exceden la resistencia a tracción del hormigón todavía inmaduro, lo cual lleva a incrementar la porosidad y la fisuración y por lo tanto, reduce potencialmente la resistencia final. Un incremento en la temperatura temprana de curado hace que la velocidad de hidratación y la resistencia del hormigón aumenten rápidamente, pero debido a la difusión no-homogénea de los productos de hidratación y al diferencial entre los coeficientes de expansión térmica de sus constituyentes, la porosidad dentro de la pasta de cemento se incrementa, de igual forma que se desarrollen microfisuras, lo cual, finalmente conduce a una reducción en la resistencia a compresión a edades posteriores. [Kim et al., 1998]

Una explicación de los efectos adversos de una alta temperatura de curado a edades tempranas en el hormigón ha sido extendida por [Verbeck y Helmuth, 1968], quienes sugieren que una rápida velocidad inicial de hidratación a elevadas temperaturas retarda la subsecuente hidratación y produce una distribución no-uniforme de los productos de hidratación dentro de la pasta. La razón a esto es que, a una velocidad alta inicial de hidratación, no hay tiempo suficiente para la difusión de los productos de hidratación más allá de la partícula de cemento y para una precipitación uniforme en el espacio intersticial (tal como sucede a temperaturas mas bajas). Como resultado, una alta concentración de productos de hidratación es acumulada en las proximidades de las partículas que se están hidratando y, esto retarda la subsecuente hidratación por lo que se afecta adversamente la resistencia del hormigón a largo plazo. Además, la distribución no-uniforme de los productos de hidratación por sí sola afecta la resistencia debido a que la relación gel/espacio en los intersticios es menor que la que pudiese ser en otro caso para un mismo grado de hidratación. [Neville, 1999]

A manera de resumen podemos decir que una precipitación rápida y no uniforme de los productos de hidratación, como consecuencia de un curado a temperaturas superiores a la ambiente, genera una disposición espacial “más desordenada” de dichos productos lo que a su vez produce un desarrollo microestructural más heterogéneo y menor compacto (sistema poroso menos refinado) que se refleja en un menor aumento de resistencias mecánicas a lo largo del tiempo. [Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, 1999]

4.8 CONCLUSIONES

Después de la realización de esta campaña experimental sobre los efectos de la temperatura ambiental extrema sobre la resistencia a compresión del hormigón, las siguientes conclusiones pueden ser hechas:

- Los primeros momentos de la cinética de reacción del hormigón, incluyendo la hidratación, el fraguado y el endurecimiento inicial son muy importantes para el posterior desarrollo de resistencia mecánica.
- La principal variable de estudio denominada “edad de desmoldeo” resultó ser no-crítica para el desarrollo de resistencia a compresión del hormigón, por esta razón, dicha variable fue descartada.
- El asentamiento del hormigón resultó ser un variable no-determinante en la resistencia a compresión del hormigón, solo tiene efectos en términos de pérdida de trabajabilidad debido a temperaturas altas en condiciones de verano.
- Para las condiciones de verano, en los perfiles térmicos Δt (tiempo de reacción) es mayor y ΔT (variación térmica) es menor a últimas horas del día y viceversa. Estas variables tienen consecuencias sobre la resistencia a compresión del hormigón.
- Para las condiciones de invierno, los picos de temperatura máxima son muy difíciles de localizar debido a la poca influencia de la temperatura ambiental en los incrementos de temperatura del hormigón. De hecho, a estos niveles de temperatura, la temperatura del hormigón en cualquier etapa sigue el perfil de la temperatura ambiental.
- Para las condiciones de verano es evidente una disminución general en las resistencias con respecto al hormigón de referencia, y para las condiciones de invierno esta tendencia es revertida, es decir, las resistencias obtenidas son mayores que las del hormigón de referencia debido a la menor temperatura de exposición.
- En época de verano es más conveniente llevar a cabo la colocación y el curado del hormigón en la tarde y en época de invierno en la mañana. En breve, la clave es hacer coincidir el proceso de fraguado y endurecimiento inicial del hormigón con la etapa descendente del perfil de temperatura ambiental en verano y, en invierno, con la etapa ascendente del perfil térmico ambiental.
- El fenómeno de las pérdidas de resistencia a compresión en los periodos estivales debido a las altas temperaturas ambientales todavía no es explicado y entendido completamente, deberán ser realizados más estudios en este sentido con el propósito de explicar satisfactoriamente las causas de estas pérdidas.

- Por último, las tendencias de comportamiento mostradas en esta serie experimental pueden tener aplicaciones prácticas en el sentido de formular algún modelo para optimizar el diseño de las mezclas de hormigón para estas condiciones extremas de temperatura, principalmente las de verano.