

Capítulo

8

**Conclusiones y
perspectivas futuras**

8.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se exponen las conclusiones que se derivan de los distintos estudios desarrollados a lo largo de este trabajo. Estas conclusiones se presentan en forma de conclusiones generales y de conclusiones específicas.

Las conclusiones generales responden al cumplimiento del objetivo principal que ha guiado el desarrollo de esta tesis. Este objetivo se dirigió a estudiar experimentalmente los efectos que tiene la temperatura ambiental sobre las prestaciones del hormigón en estado fresco y endurecido, principalmente sobre la trabajabilidad y la resistencia a compresión, y sobre las propiedades de los materiales constituyentes del mismo. Por otra parte, como fruto de este estudio, a proponer las base de una formulación metodológica para la optimización del hormigón en climas cálidos en base a la variación de la temperatura ambiental y de las curvas de calor de hidratación del hormigón, actuando sobre todo en la dosificación de cemento.

Las conclusiones específicas obedecen a distintos aspectos concretos referentes a los estudios experimentales que se han realizado encaminados a conseguir los objetivos propuestos.

Finalmente, se presentan las diferentes líneas futuras de investigación que han surgido en el transcurso del presente trabajo, como reflexión del mismo.

8.2 CONCLUSIONES GENERALES

Los efectos que los factores climatológicos, especialmente durante los meses de verano, causan sobre las propiedades del hormigón, son generalmente adversos y afectan tanto a los productores como a los usuarios finales del hormigón. Las prestaciones afectadas (desde el enfoque de esta tesis doctoral) son, principalmente la trabajabilidad y la resistencia a compresión.

Las condiciones climáticas actúan directamente sobre los mecanismos del hormigón como la hidratación, fraguado, endurecimiento y desarrollo de resistencia. En este sentido se puede verificar que la temperatura bajo la cual se llevan a cabo estos procesos, es un factor de influencia en el mejor o peor desarrollo de la microestructura del hormigón mediante la aceleración de estos mecanismos.

Los resultados experimentales obtenidos apuntan a que cuando menor es el diferencial de térmico entre la temperatura del hormigón y la temperatura ambiente, mejores son los resultados relativos a prestaciones mecánicas, sin intervenir en las prestaciones del hormigón en estado fresco. Asimismo, se verifica que existe una correlación entre los resultados térmicos (variación térmica- ΔT y tiempo de reacción- Δt) y los resultados mecánicos de resistencia a compresión.

Por otro lado, a la luz de los resultados obtenidos en toda la investigación, se entiende que el árido es, probablemente, el factor principal, no sólo por las características específicas de su comportamiento con la temperatura, sino también, porque es el componente más numeroso en el hormigón.

De los resultados y tendencias observadas en los ensayos experimentales, se puede deducir que la trabajabilidad y la resistencia del hormigón están influenciadas por las propiedades de los áridos, las cuales son susceptibles de variaciones en función de la temperatura. En este sentido, la temperatura actúa sobre la velocidad de absorción y el rozamiento interno de los áridos, mientras que en el hormigón tiene un efecto sobre su desempeño (estado fresco y endurecido) y sobre el coste final (consumo de cemento). Estas relaciones son mostradas gráficamente en la **figura 8.1**.

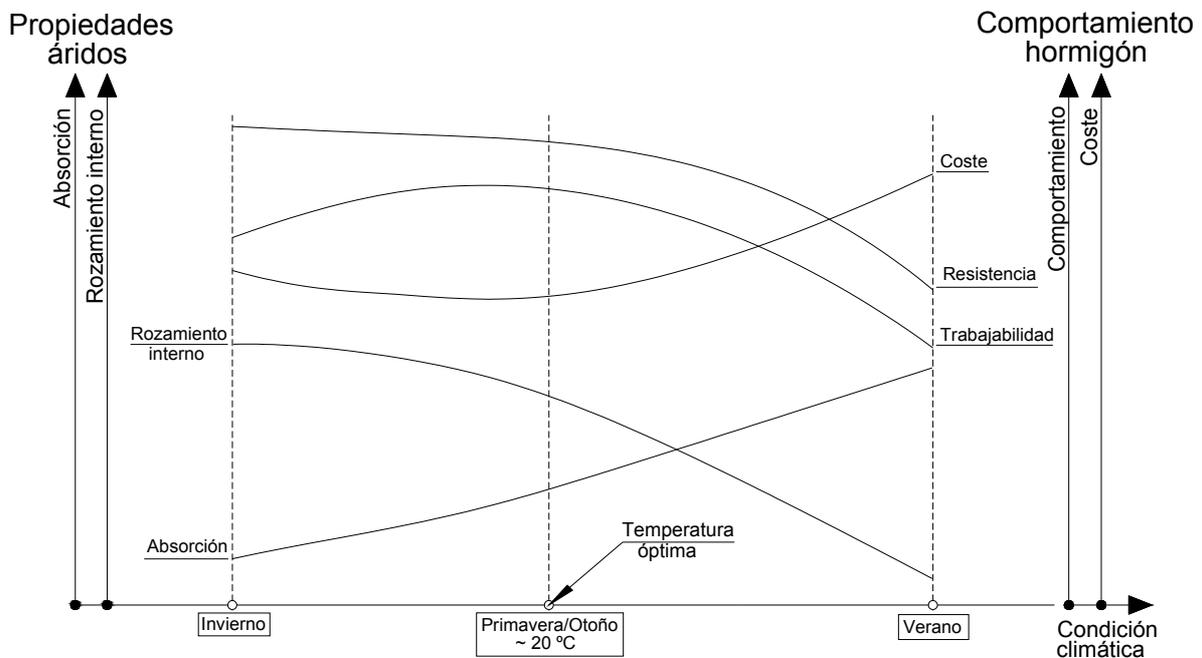


Figura 8.1.- Relaciones entre los áridos y el comportamiento del hormigón

Las asociaciones anteriormente ilustradas son significativas en términos de sus potenciales aplicaciones a escala industrial en la producción de hormigón preparado, debido a que las características del hormigón son dependientes de las propiedades de los áridos y éstas son altamente influenciadas por las condiciones ambientales.

Con el propósito de reducir costes, el consumo de cemento en el hormigón puede ser optimizado en función de variables dependientes de la temperatura, sin tener detrimentos en las prestaciones del hormigón en estado fresco y endurecido. La forma de actuar frente a este problema consiste básicamente en lograr que el comportamiento del hormigón en verano sea el mismo que en primavera y otoño, lo anterior se puede llevar a cabo mediante actuaciones a escala industrial, principalmente sobre la dosificación de cemento y sobre los áridos.

8.3 CONCLUSIONES ESPECIFICAS

8.3.1 Conclusiones referentes a los ensayos con hormigón

- 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.
- Las temperaturas ambientales altas en verano ocasionan pérdidas de trabajabilidad en el hormigón, asimismo, una baja temperatura ambiental (invierno) tiene el mismo efecto pero en menor magnitud. Las mejores trabajabilidades se obtienen para temperaturas intermedias.
- Se confirma el ya conocido hecho de que 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 períodos 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 éstas pérdidas.
- Por último, las tendencias de comportamiento mostradas en esta serie experimental pueden ser el punto de partida para el desarrollo de aplicaciones a nivel industrial mediante la formulación de algún modelo para optimizar el diseño del hormigón en condiciones climáticas extremas, principalmente las de verano.

8.3.2 Conclusiones referentes a los ensayos con áridos

- El coeficiente de absorción de los áridos aumenta con el incremento de la temperatura ambiental y la de los propios áridos; esta tendencia es más marcada con los áridos finos (arenas).
- Dentro del rango de tiempos de saturación estudiados (30 minutos y 24 horas), las diferencias son poco significativas, lo que representa que el mayor porcentaje de absorción se produce durante los primeros minutos, esto es, durante el amasado del hormigón, lo que significa pérdidas de trabajabilidad inicial.
- La fricción interna de los áridos (medida mediante los ángulos de reposo, estabilidad y rozamiento interno en arenas) es menor a mayor temperatura. En este caso los valores de estos ángulos serán mayores para arenas con mayor módulo de finura.
- En el caso del mortero, la peor consistencia se obtuvo para las condiciones de verano, lo que concuerda con lo obtenido en ensayos con hormigón. En relación al contenido de humedad, los mejores resultados se obtuvieron generalmente con contenidos de humedad cercanos a la situación de saturación y superficie seca.
- En relación a la secuencia de adición de materiales, el ‘Método 2’ (en el cual se añade parte del agua junto con la arena en el inicio del mezclado y el resto del agua casi al final del proceso, después de haber añadido el cemento) resultó en mejores consistencias. No obstante, este efecto fue contraproducente desde el punto de vista mecánico, teniéndose menores valores de resistencia a compresión.
- Los ensayos experimentales muestran que la trabajabilidad del mortero depende de la temperatura de los áridos, debido a cambios en la absorción y en la fricción interna de éstos.
- En cuanto a posibles aplicaciones industriales en la producción de hormigón preparado, es posible su optimización mediante el tratamiento de algunas de las propiedades de los áridos que dependan de la temperatura ambiental.

8.3.3 Conclusiones referentes a los ensayos con morteros y pastas

- Los resultados térmicos (variación térmica- ΔT y tiempo de reacción- Δt) corresponden de manera general con los resultados obtenidos en los **Capítulos 4 y 5** de ensayos con hormigón y mortero en el sentido de que las variaciones térmicas (ΔT) son mayores cuando mayor es la temperatura, y los tiempos de reacción (Δt) son menores cuando mayor es la temperatura también. Asimismo, estos resultados tienen relación directa con el desarrollo de resistencia mecánica.

- Los resultados de consistencia señalan que las condiciones climáticas extremas (verano e invierno) representan una disminución de la trabajabilidad respecto a las condiciones de referencia. Para las condiciones de verano, la mayor demanda de agua hace más áspera la mezcla al perder parte del efecto lubricador del agua, en condiciones de invierno, existe el agua libre, si bien la pérdida de trabajabilidad es consecuencia de unos áridos menos trabajables. De igual forma se confirman los resultados obtenidos en los **Capítulos 4 y 5**.
- La resistencia a compresión aumenta a medida que disminuye la temperatura media estudiada. Así, las mayores resistencias se obtienen para los ciclos más fríos; ello concuerda con lo observado en probetas de hormigón del **Capítulo 4** y con las probetas de mortero en el **Capítulo 5**.
- Las condiciones climáticas extremas influyen en el desarrollo microestructural y la formación del gel C-S-H, principal producto de hidratación responsable del desarrollo de resistencias, especialmente en las edades más tempranas.
- La formación de gel C-S-H ocurre de forma continuada y progresiva en la pasta de referencia y en la pasta sometida a condiciones de invierno. Sin embargo, en la pasta sometida a condiciones de verano la cantidad de C-S-H formado no aumenta entre 48 horas y 7 días indicando una inhibición de las reacciones de hidratación. Posteriormente evoluciona de forma similar a las otras dos pastas.
- A la edad de 48 días, la cantidad de C-S-H formado, así como su morfología, depende significativamente de las condiciones climáticas. Así, la pasta sometida a condiciones de invierno muestra, mediante RMN, una escasa formación de C-S-H, mientras que en la pasta de referencia y en la sometida a condiciones de verano la formación de C-S-H es muy significativa, tal y como confirman los resultados obtenidos mediante SEM.
- La cantidad de C-S-H formado a la edad de 28 días es similar en las tres pastas estudiadas indicando niveles de hidratación parecidos en las tres muestras. Asimismo, a esta edad, las pastas muestran microestructuras caracterizadas por un extensivo crecimiento de C-S-H cuyas principales diferencias radican en la morfología, composición y tamaño de las diferentes fases cristalinas, las cuales, en principio, no contribuyen de manera significativa al desarrollo de resistencias.

8.3.4 Conclusiones referentes al estudio sobre pastas con aditivo polifuncional

- Aunque el aditivo polifuncional no afecta significativamente a la fluidez de las pastas de cemento, su incorporación es fundamental para obtener un correcto mantenimiento de la fluidez de la pasta de cemento a las tres temperaturas estudiadas.

- El aditivo utilizado tiene un papel de gran importancia como regulador de cinéticas de reacción. Las estrategias de reducir un punto (en la dosificación al millar) en invierno y aumentar un punto de verano son correctas.
- El aditivo polifuncional empleado parece que no es una variable principal en el estudio respecto a la optimización del consumo de cemento en hormigones con diferentes condiciones climáticas. Sin embargo esto no puede extrapolarse a otros aditivos sin una contrastación experimental.

8.3.5 Conclusiones referentes a la propuesta metodológica para la optimización de cemento

- 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 también en los **Capítulos 4, 5 y 6**.
- 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.
- 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.

8.4 PERSPECTIVAS FUTURAS

A lo largo del trabajo presentado se han puesto de manifiesto paralelamente otras líneas futuras de investigación principalmente relacionadas con aspectos de optimización y con perspectivas industriales. A continuación se exponen las que más interesan y que están relacionadas con los aspectos tratados en esta tesis doctoral:

- Hacer un estudio de retroalimentación del funcionamiento de la propuesta metodológica en base a los resultados obtenidos en plantas de producción de hormigón preparado, una vez implementada y para diferentes situaciones geográficas.
- Asimismo, adecuar el funcionamiento del método para otro tipo de hormigones, como hormigones especiales o que contengan tipos diferentes de cemento.
- Realizar investigaciones sobre la viabilidad técnica y económica de aplicar un tratamiento de humedad superficial a los áridos mediante la instalación de difusores con el objeto de disminuir los efectos negativos sobre el hormigón (fresco y endurecido), que son amplificadas con la temperatura.
- Perfeccionar el funcionamiento de la propuesta metodológica para la optimización de cemento mediante la implementación de técnicas más avanzadas de simulación mediante un modelo integral multiescala termo-químico-mecánico (elementos finitos), que considere con mayor rigor la interacción de las variables implicadas.
- Realizar investigaciones sobre la optimización del hormigón preparado en todos sus aspectos mediante la utilización de redes neuronales o plantas robotizadas.
- Profundizar más en los estudios a nivel micro y nanoestructural del hormigón producido en climas cálidos, analizando las distintas fases que lo componen con el objeto de comprender mejor el funcionamiento del deterioro producido por la temperatura a este nivel.
- De igual forma, trasladar el estudio a nivel micro y nanoestructural a los áridos, con el objeto de conocer con mayor profundidad los mecanismos de variación de la fricción interna de estos con la temperatura.
- Aplicar algunos conceptos y métodos más avanzados como el de la reología para medir el comportamiento intrínseco de los áridos a diferentes humedades y temperaturas y su efecto final sobre la trabajabilidad del hormigón.