

# Capítulo

# 1

## Introducción



## 1.1 ANTECEDENTES

La fabricación de hormigones con cemento Portland, en condiciones climáticas extremas, ya sean de altas temperaturas o de bajas temperaturas, influye de manera directa en las características del hormigón para cualquier etapa del mismo: amasado, transporte, puesta en obra, curado, así como en las propiedades físicas y mecánicas. Ello constituye una preocupación tanto para los fabricantes como para los usuarios de dichos hormigones por las evidentes consecuencias negativas que esto tiene sobre los aspectos técnicos y económicos.

El hormigón fabricado en períodos estivales generalmente presenta resistencias menores que la resistencia promedio del año y que las obtenidas en otras estaciones climáticas. Este fenómeno es registrado a partir de los resultados arrojados por las probetas de control, con las cuales se mide la calidad en la producción del hormigón preparado. De igual forma, las causas de este efecto no son debidas a modificaciones en la calidad del cemento, ni de los áridos, ni de cualquier otro constituyente presente en el hormigón.

En este sentido, existen algunos problemas específicos en relación a la calidad del hormigón preparado en climas cálidos. Una alta temperatura ambiental tiene como consecuencia una mayor demanda de agua del hormigón y un aumento en la temperatura de dicho hormigón en estado fresco. Lo anterior, tiene como resultado un incremento en la velocidad de pérdida de fluidez y en una más rápida hidratación del cemento, lo cual conduce a un aceleramiento en el fraguado y en una menor resistencia del hormigón. Asimismo, esto implica la frecuente adición de agua al hormigón con el objeto de restablecer la trabajabilidad original. Como resultado de todo lo anterior, la temperatura ambiental alta puede afectar adversamente las propiedades mecánicas y de servicio del hormigón endurecido.

Cuando el cemento Portland es mezclado con agua se libera calor, este calor es llamado calor de hidratación, que es el resultado de la reacción química exotérmica entre el cemento y el agua. El calor generado por la hidratación del cemento incrementa la temperatura del hormigón. El efecto conjunto de las condiciones térmicas ambientales y el calor de hidratación del cemento en el hormigón en climas cálidos agrava las consecuencias perjudiciales sobre la resistencia mecánica final del hormigón, principalmente la resistencia a compresión.

Paradójicamente, a pesar de lo antiguo del problema y también de su importancia, no son muchas las investigaciones conocidas que hayan tratado una posible solución. De hecho, la mayoría de los manuales de buena práctica se limitan a recomendar algunas actuaciones sobre los constituyentes del hormigón reduciendo la temperatura de éstos o evitando que las elevadas temperaturas veraniegas incidan en cualquiera de las etapas de fabricación y puesta en obra del hormigón.

Por otro lado, existen muchas metodologías de actuación para minimizar los efectos perjudiciales de las condiciones meteorológicas sobre la resistencia del hormigón. Entre éstas posibles ‘soluciones’ podemos citar las siguientes:

- Actuaciones sobre los áridos.- el mayor volumen del hormigón lo constituyen los áridos. Si se consigue una reducción de temperatura de los mismos, disminuiría de forma muy significativa la temperatura del hormigón. Sin embargo debido al calor específico de los áridos, el cual es del orden de 0,22 aproximadamente respecto al del agua, requiere de más tiempo y de más recursos energéticos que por ejemplo, el agua.
- Actuaciones sobre el agua de amasado.- la temperatura del agua tiene la ventaja de poder ser más fácilmente controlada (calor específico = 1), y a pesar de que se emplea en menores cantidades que los otros constituyentes, el uso de agua fría efectuará una moderada reducción en la temperatura del hormigón. Además, siempre que sea permisible puede agregarse hielo como reemplazo del agua de amasado.
- Actuaciones sobre los aditivos.- los aditivos principalmente actúan sobre el cemento retrasando el fraguado (retardadores) y reduciendo la cantidad del agua (plastificantes), asimismo evitan una elevada reacción exotérmica de hidratación durante el fraguado. Los aditivos retardadores, retardarán el fraguado y reducirán la necesidad de agua, compensando parcialmente los efectos del tiempo caluroso sobre la manejabilidad, fisuración, tiempo de fraguado y demanda adicional de agua. Los aditivos plastificantes disminuyen la tensión interfacial en el contacto grano de cemento-agua lo que provocará el mojado de los granos. La recomendación habitual es aumentar la cantidad de aditivo polifuncional en un 1 por mil en el verano (respecto a la dosificación estándar usada durante las estaciones de primavera y otoño).
- Actuaciones sobre la dosificación del cemento.- es recomendable no utilizar cementos de rápido endurecimiento y sí utilizar cementos de moderado calor de hidratación. Asimismo es común, junto con el aditivo, sobredosificar la cantidad de cemento para de ésta forma compensar la resistencia pérdida debido a los ya mencionados efectos perjudiciales de las condiciones climatológicas, sin embargo, esto tiene como consecuencia un aumento en los costes del hormigón.
- Actuaciones sobre el curado.- el curado es probablemente la etapa más crítica del hormigón para las posteriores propiedades físicas y mecánicas. Un buen curado asegura en gran medida la garantía de las prestaciones que tendrá el hormigón. El control de este aspecto, sin embargo, no está al alcance del fabricante del hormigón sino del ejecutor de la obra.

- Actuaciones sobre los procesos de producción, logísticos y de construcción.- deben estudiarse las secuencias de adición de los materiales para la producción del hormigón de tal forma que durante el amasado inicial los áridos absorban la menor cantidad posible de agua de amasado, asimismo adicionar los aditivos en la etapa de amasado en la cual tengan un mejor efecto. Por otro lado, durante el trayecto de la planta a la obra, el hormigón deberá ser agitado dentro del camión a las mínimas revoluciones posibles. Por último en el aspecto constructivo es recomendable enfriar los moldes y encofrados en los cuales se colocará el hormigón, programar los hormigonados de tal forma que durante la etapa de fraguado y endurecimiento inicial, la temperatura vaya en tendencia descendiente o tenga temperaturas menores de las consideradas críticas. También se pueden implementar otro tipo de procedimientos como pantallas protectoras del viento, utilizar rociadores de niebla para elevar la humedad y disminuir la temperatura, etc.

Después de analizar todas estas posibles actuaciones desde muy distintos puntos de vista, se observa que no existe ninguna metodología estricta que evite los efectos perjudiciales de la temperatura sobre el hormigón. De hecho las causas de este fenómeno aún no son totalmente entendidas o identificadas por lo que no existe ninguna solución que evite completamente este problema. De igual forma las actuaciones antes referidas no evitan el problema sino que solo minimizan los efectos que se producen.

Tomando como punto de partida dichas metodologías de actuación y cuya implementación está al alcance de los productores de hormigón preparado, podemos citar las siguientes:

- Actuaciones sobre la dosificación del cemento
- Actuaciones sobre el agua de amasado
- Actuaciones sobre los aditivos
- Actuaciones sobre los áridos
- Actuaciones sobre los procesos de producción y logísticos

## 1.2 OBJETIVO PRINCIPAL

El objetivo principal de esta tesis doctoral es estudiar los efectos que tiene la temperatura ambiental sobre las prestaciones del hormigón en estado fresco y endurecido y sobre las propiedades de los materiales constituyentes del mismo. Asimismo conocer la forma en que estos efectos conjuntos repercuten en la resistencia a compresión del hormigón.

Por otro lado, se pretende sentar las bases de una propuesta 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 principalmente sobre la dosificación de cemento.

### **1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Si lo expuesto es el objetivo general, para llegar a él ha sido necesario cubrir diferentes etapas, que en sí mismas, representan los objetivos específicos del presente trabajo y que sin su obtención no sería posible la consecución del objetivo principal anteriormente mencionado. Entre estos objetivos específicos destacaremos los siguientes:

- Hacer una revisión crítica del estado actual del conocimiento en la problemática de la pérdida de resistencia del hormigón preparado en verano y de los factores (causas y consecuencias) que enmarcan esta problemática, con el objeto de analizar los diferentes métodos existentes de minimización de los efectos perjudiciales sobre el hormigón y proponer el desarrollo de un trabajo de investigación propio.
- Determinar la influencia de las temperaturas ambientales extremas sobre las propiedades térmicas, de trabajabilidad y mecánicas del hormigón, morteros, pastas de cemento y áridos, desarrollando los procedimientos y herramientas experimentales de caracterización necesarias.
- Correlacionar los distintos comportamientos observados para cada uno de los constituyentes en función de la temperatura, con el objeto de establecer las posibles líneas de actuación metodológicas.
- Proponer una metodología de optimización de cemento en el hormigón en función de su comportamiento térmico y su respuesta mecánica ante las altas temperaturas ambientales, mediante el desarrollo de una herramienta para la toma de decisiones a nivel industrial.
- Dotar las bases metodológicas para la implementación a nivel industrial de la metodología en un sistema de dosificación integral informatizado.
- Obtener conclusiones generales y específicas sobre los estudios experimentales desarrollados y sobre la propia metodología propuesta.
- Comprobar la fiabilidad de la metodología desarrollada en campañas experimentales de laboratorio y de campo.

### **1.4 ESTRUCTURA DE LA TESIS**

Para conseguir los objetivos propuestos se han desarrollado distintos trabajos, los cuales dan contenido a los diferentes capítulos de esta tesis. A continuación se describe brevemente la metodología seguida en cada uno de ellos.

En el **Capítulo 2** se aporta una panorámica general sobre los aspectos más relevantes que inciden en la problemática de la pérdida de resistencia del hormigón preparado en períodos estivales y de los factores (causas y consecuencias) que enmarcan esta problemática.

Asimismo se mencionan desde un punto de vista global, los efectos que las condiciones ambientales ocasionan en las propiedades del hormigón tanto en estado fresco (trabajabilidad) como en estado endurecido (resistencia a compresión), analizando cada factor de influencia, bajo una perspectiva industrial y desde puntos de vista tecnológicos y económicos, principalmente.

También, se analiza desde una perspectiva más científica la influencia que ejercen las condiciones ambientales en los mecanismos físico-químicos del hormigón, relacionados con la formación de microestructura y posteriormente, de atributos mecánicos como la resistencia a compresión.

Finalmente se mencionan algunos de los métodos aplicados para minimizar los efectos perjudiciales de la alta temperatura ambiental en las propiedades del hormigón, desde un punto de vista industrialmente aplicado, con el objeto de encontrar algunas carencias en las soluciones actualmente existentes y detectar áreas de oportunidad a desarrollar.

En el **Capítulo 3** se definen los materiales utilizados en todas las campañas experimentales y se muestran los resultados de su caracterización. Asimismo se explican y detallan algunas de las consideraciones experimentales utilizadas para llevar a cabo la parte empírica de esta tesis doctoral, como por ejemplo las instalaciones especiales y el equipo utilizado, así como los ciclos de temperatura simulados en laboratorio. Lo anterior tiene como objetivo que la reproducibilidad de estos ensayos pueda hacerse independientemente del conocimiento a priori de este trabajo de investigación.

En el **Capítulo 4** 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, los cuales se dividen en dos categorías principalmente: resultados térmicos y resultados mecánicos. En todos los casos se hace un análisis comparativos entre las dos condiciones climáticas estudiadas (verano e invierno) y se correlacionan los resultados térmicos y mecánicos.

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.

En el **Capítulo 5**, el cual es el más extenso de este documento, se describe la metodología seguida para la realización de los ensayos correspondientes a las series experimentales con áridos (gravas y arenas), asimismo se muestran y analizan los resultados obtenidos. El objeto de este capítulo es el de conocer el comportamiento de los áridos bajo la influencia de la temperatura para, en base a esto, poder determinar su influencia final en las propiedades del hormigón, principalmente en estado fresco.

En primer lugar se presentan los ensayos realizados en la etapa preliminar, la cual representa el primer acercamiento al estudio de las condiciones de la temperatura sobre las propiedades de los áridos y posteriormente se presentan los estudios de absorción de los áridos, bajo dos tiempos de saturación: 30 minutos y 24 horas; estos estudios se han hecho sobre gravas y arenas de diferente clasificación granulométrica y con tres diferentes condiciones climatológicas: referencia, verano e invierno.

Posteriormente, se presentan los aspectos estudiados sobre la compactación dinámica de los áridos, en el cual se trata de observar y caracterizar el comportamiento de los áridos bajo energía de compactación vibratoria y bajo las tres diferentes condiciones térmicas.

Asimismo, se realizaron ensayos de inercia térmica de los áridos, con el objeto de conocer que desplazamientos (en temperatura y en tiempo) sufría una masa de áridos respecto a la temperatura ambiental y que forma una parte importante de la propuesta metodológica a implementar posteriormente.

Por último, se realizó una serie de ensayos para determinar la influencia de la temperatura ambiental y el contenido de humedad de los áridos sobre las propiedades y el comportamiento intrínseco de éstos, mediante la determinación de algunas propiedades físicas de las arenas. Paralelamente y utilizando arena de 0-5 mm, se fabricaron morteros bajo tres condiciones climáticas (referencia, verano e invierno) para medir en ellos la trabajabilidad y la resistencia a compresión. En todos los casos se presentan las conclusiones específicas y finalmente se presenta una discusión y las conclusiones generales.

En el **Capítulo 6** se incluyen los trabajos elaborados en morteros y pastas de cemento, principalmente se describe la metodología seguida y se muestran y analizan los diferentes resultados obtenidos, diferenciándose tres categorías: resultados térmicos, resultados mecánicos y resultados microestructurales.



El objeto de este estudio es el de conocer la influencia de la temperatura ambiental sobre las propiedades de trabajabilidad, mecánicas y microestructurales de morteros y pastas de cemento. En este sentido se hicieron ensayos de consistencia y resistencia a compresión sobre probetas prismáticas de mortero y se realizó un estudio sobre pastas de cemento fabricadas en condiciones climáticas extremas a través del análisis microestructural, mediante técnicas de Resonancia Magnética Nuclear (RMN) y Microscopía Electrónica de Barrido (SEM).

Cabe mencionar que en esta tesis, para el caso de los ensayos de RMN y SEM, se mostrará el análisis de los resultados y las conclusiones obtenidas directamente por la autora Joana Roncero y se analizarán pero tomándolos solo como referencia, otorgándole el debido crédito a la autora.

En el **Capítulo 7**, se presenta el desarrollo de la metodología propuesta para realizar la optimización de los consumos de cemento en el hormigón en verano. Los principales aspectos tratados aquí tienen relación con algunos fundamentos teóricos sobre la dependencia de la resistencia del hormigón con la temperatura, la temperatura del hormigón en los primeros instantes y posteriormente, el calor de hidratación y la transferencia o absorción de temperatura de éste al ambiente.

El objetivo principal de este capítulo es describir el desarrollo de la metodología propuesta, asimismo verificar y validar la viabilidad de dicha metodología sobre hormigones elaborados a diferentes horas del día dentro de un ciclo de temperatura variable y aplicando al mismo tiempo una política escalonada de sobredosificación de cemento.

Posteriormente se define el plan de trabajo correspondiente a la campaña experimental llevada a cabo con el objeto de validar y contrastar la metodología planteada. Asimismo se presentan y analizan los resultados obtenidos, mostrando el comportamiento térmico del hormigón y la concordancia de las curvas térmicas obtenidas con las programadas y con las estimadas numéricamente por medio de la herramienta desarrollada. También se muestran los resultados correspondientes al hormigón en estado fresco (trabajabilidad) y en estado endurecido (resistencia a compresión a 7 y 28 días).

En el **Capítulo 8**, último de esta tesis, se presentan en primer lugar las conclusiones generales, derivadas de los distintos trabajos realizados, que responden al objetivo principal propuesto. Con posterioridad se exponen las conclusiones específicas que obedecen a los diferentes aspectos concretos de los trabajos desarrollados, definiéndose las mismas de forma detallada. A continuación, se presentan las diferentes líneas futuras de investigación surgidas como consecuencia de los trabajos desarrollados en la presente tesis doctoral.

Por último, en el apartado de **Referencias**, se recogen las fuentes bibliográficas más significativas consultadas en el transcurso del presente trabajo.

Como parte de esta tesis doctoral, existen algunos aspectos importantes desarrollados a lo largo de este trabajo que se decidió incluirlos como anejos.

En el **Anejo A** se amplía la información relativa al análisis granulométrico de los áridos utilizados, el **Anejo B** incluye un estudio sobre el comportamiento de pastas con aditivo polifuncional en función de la temperatura, el cual forma parte importante del tema bajo estudio.

En el **Anejo C** se muestran los resultados obtenidos en la campaña de caracterización microestructural de pastas y morteros de cemento, en el cual se muestran con mayor detalle las técnicas experimentales empleadas y los resultados obtenidos.

El **Anejo D** contiene un análisis estadístico de las temperaturas de los meses de verano de los últimos 9 años, el cual forma parte de la propuesta metodológica para la predicción de la temperatura ambiental.

Finalmente, en el **Anejo E** se incluye una relación de los artículos publicados en revistas de alto índice de impacto y en congresos internacionales, fruto de este trabajo de investigación.

Cabe mencionar, que la presente tesis doctoral se ha realizado en el marco de dos convenios de colaboración (C-4669 y C-5737) entre el Grupo Cementos Molins con el Departamento de Ingeniería de la Construcción de la UPC, en colaboración con el Centro de Innovación Tecnológica de Estructuras y Construcción (CEINTEC) y gestionados por el Centro de Transferencia de Tecnología (CTT).