

Capítulo

2

**Estado del
Conocimiento**

2.1 INTRODUCCIÓN

El objeto de este capítulo es aportar una visión global e ilustrativa del Estado del Conocimiento 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.

En primer lugar se hará referencia al problema en cuestión, bajo la perspectiva industrial y desde puntos de vista tecnológicos y económicos. Asimismo se definirán las condiciones de clima cálido y sus repercusiones sobre las propiedades del hormigón y sobre la construcción con hormigón preparado.

Posteriormente se analizarán los efectos que provoca la temperatura ambiental sobre las propiedades del hormigón en estado fresco y endurecido, desde un punto de vista científico y desde un punto de vista más tecnológico-industrial, en lo que se refiere al hormigón preparado.

A continuación sigue una sección con mayor contenido analítico de las causas o factores que tienen relación con los problemas del hormigón a temperaturas ambientales altas, explicando su importancia en la fabricación del hormigón preparado y sus consecuencias sobre las propiedades de éste. Entre estos factores se analizan los parámetros térmicos ambientales, la temperatura de los constituyentes del hormigón, la temperatura inicial del hormigón, el contenido y tipo de cemento y aditivos utilizados, algunas propiedades de los áridos, aspectos industriales o de producción y por último, el factor humano en la producción y manejo del hormigón preparado.

Después se analizan los mecanismos de comportamiento principales del hormigón y como la temperatura actúa sobre ellos, es decir, 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 y la durabilidad.

También se hace mención de los principales métodos prácticamente aplicados para minimizar los efectos perjudiciales de la alta temperatura ambiental en las propiedades del hormigón, desde un punto de vista industrialmente aplicado. En este apartado se recogen diferentes estrategias comunes localizadas en las fuentes de información bibliográfica y se analiza su viabilidad técnica y económica. Algunos de estos métodos pueden actuar sobre los materiales constituyentes del hormigón y sobre su dosificación (optimización), asimismo también pueden estar relacionados directamente con prácticas productivas y constructivas específicas.

Se hacen finalmente las conclusiones principales y las carencias encontradas en las soluciones actualmente existentes, en este sentido también se propone una metodología implementable a nivel industrial y basada en el manejo de la información climatológica para realizar una optimización en el consumo de cemento del hormigón.

Cabe mencionar que el enfoque dado en el análisis de estos temas se centra en las condiciones de temperatura ambiental alta, es decir, condiciones estivales o de verano. En los capítulos posteriores podrá verse que se manejan ensayos experimentales e información relativa también a condiciones de temperaturas bajas o de invierno, sin embargo esto se hace solamente con propósitos comparativos y con el objeto de marcar la diferencia entre una condición y otra.

2.2 INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA AMBIENTAL EN LAS PROPIEDADES DEL HORMIGÓN PREPARADO

En este apartado se hará referencia a la problemática del hormigonado en climas cálidos o en períodos estivales mediante el análisis de la problemática a nivel industrial y económico. Asimismo se hará la definición de clima cálido y los factores necesarios para su cumplimiento. También se detallan algunos problemas potenciales que el hormigón puede sufrir como consecuencia de haber sido fabricado o utilizado en condiciones ambientales de clima cálido.

2.2.1 Análisis de la problemática (consideraciones industriales y económicas)

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.

Si realizamos un estudio en la bibliografía especializada sobre el hormigón encontramos en la mayoría de los tratados un capítulo dedicado al hormigonado en climas cálidos, problemas del hormigón a altas temperaturas y muchos otros temas similares. Además, dentro del sector de la construcción es conocido que se dan pérdidas de resistencia en los periodos estivales ya que según los resultados que se obtienen en los laboratorios año tras año se observa dicho fenómeno de forma recurrente, para controlar dichos efectos.

[Comella et al., 2002], recogen una serie de datos estadísticos de resistencia a compresión simple a 28 días de hormigones H-300 tomadas de una empresa de control y correspondientes a hormigones colocados en el Área Metropolitana de Barcelona. La **figura 2.1** muestra la temperatura media y la resistencia media de los hormigones en cada uno de los intervalos analizados.

En la citada figura se observa como el período anual con menor resistencia se trata del verano, obteniendo las mínimas resistencias en el mes de junio. Posteriormente a este mínimo tenemos unas recuperaciones más o menos progresivas a pesar de seguir teniendo temperaturas hasta mayores que la correspondiente al mes de mínima resistencia, lo que nos indica que las plantas ante la obtención de resultados bajos, cambian la dosificación de cemento habitual, por otra mayor que aporte la resistencia especificada teniendo finalmente un coste más elevado.

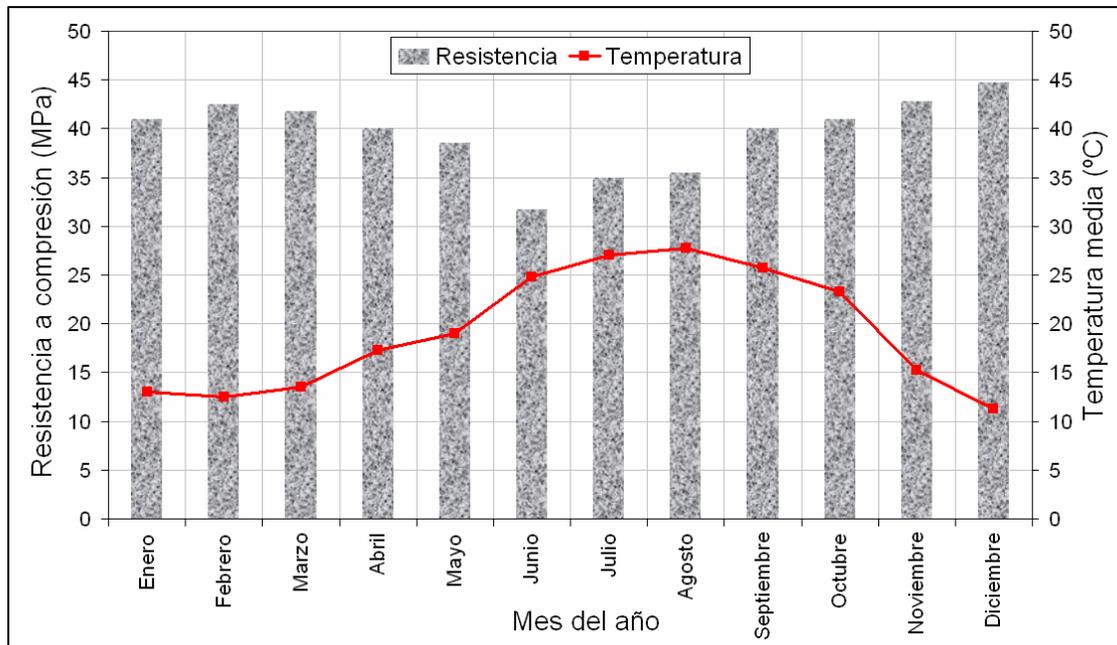


Figura 2.1.- Evolución de la temperatura y resistencia a lo largo de un año (H-300)

Cuando el hormigón se mezcla, se transporta y se pone en obra bajo condiciones de elevada temperatura ambiental, alta radiación solar, baja humedad relativa y viento apreciable, resulta esencial tomar en consideración los efectos que estos factores climáticos ejercen sobre las propiedades del hormigón. Naturalmente, para minimizar o incluso eliminar la incidencia negativa que todos estos factores pueden producir en las prestaciones del material, es razonable pensar en la necesidad de conocer y comprender la forma en que estos actúan. [Palomo et al., 2000]

Algunos de los problemas específicos en relación al hormigonado en climas cálidos son los siguientes. Una alta temperatura ambiental tiene como consecuencia una mayor demanda de agua del hormigón y un incremento 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. [Neville, 1999] Asimismo, esto implica la frecuente adición de agua al hormigón con el objeto de restablecer la trabajabilidad original. [Mouret et al., 1997] Como resultado de todo lo anterior, la temperatura ambiental alta puede afectar adversamente las propiedades mecánicas y de servicio del hormigón endurecido. [Soudki et al., 2001]

De igual forma, 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. La mayor velocidad de liberación de

calor ocurre dentro de las primeras 24 horas y una gran cantidad de calor se desarrolla durante los primeros 3 días. [Portland Cement Association, 1997] Los procesos químicos asociados al endurecimiento del hormigón en los primeros días después de hormigonar están acompañados por cambios térmicos significativos debido a que la hidratación del cemento es altamente exotérmica y es una reacción activada térmicamente. [Cervera et al., 2002] 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.

Otro factor de importancia y que incide directamente sobre los resultados estadísticos de resistencia a compresión del hormigón fabricado industrialmente es debido a los métodos de control de calidad utilizados tradicionalmente. En este sentido, el control del hormigón a través de probetas de ensayo se hace mucho más complicado en tiempo caluroso. Las condiciones atmosféricas reinantes (elevadas temperaturas, bajas humedades relativas y vientos secos) son mucho más perjudiciales para las probetas por su pequeño tamaño. El hecho de dejar por tanto las probetas enmoldadas directamente expuestas a la acción del viento o del sol introducirá importantes variaciones en sus características, y hará que los resultados obtenidos con ellas no sean en absoluto representativos. En tiempo caluroso habrá que aumentar la frecuencia de ensayo de propiedades tales como la consistencia, la temperatura del hormigón o el principio y final de fraguado, pues se van a ver muy influidas por las condiciones atmosféricas. [Vaquero, 2003]

Analizando este escenario, podemos constatar el hecho paradójico de que 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. [Palomo et al., 2000]

2.2.2 Definición de clima cálido [ACI Committee 305, 1991]

El clima cálido es definido por el Comité 305 (Hot Weather Concreting) del ACI como “una combinación de las condiciones que tienden a deteriorar la calidad del hormigón en estado fresco o endurecido, mediante la aceleración de la velocidad de pérdida de humedad y la velocidad de hidratación del cemento”. Dichas condiciones se citan a continuación:

1. Alta temperatura ambiental
2. Alta temperatura del hormigón
3. Baja humedad relativa
4. Velocidad del viento
5. Radiación solar

Algunos problemas potenciales del hormigón en estado fresco son los siguientes:

1. Incremento en la demanda de agua.
2. Incremento en la pérdida de fluidez o asentamiento y el correspondiente problema de la adición de agua en la obra.
3. Incremento en la velocidad de fraguado, lo que resulta en una mayor dificultad para manejar, compactar y darle acabado al hormigón, asimismo una mayor probabilidad de tener juntas frías.
4. Incremento en la tendencia de agrietamiento por retracción plástica

Por otro lado, el hormigón en estado endurecido tiene los siguientes problemas en climas cálidos:

1. Pérdida de resistencia a edades de 28 días y posteriores como resultado de una mayor demanda de agua y de una temperatura mayor del hormigón.
2. Tendencia a la retracción por secado y al agrietamiento debido a diferenciales térmicos.
3. Reducción de la durabilidad.
4. Mayor variación en la apariencia superficial.

Otros factores que complican las operaciones de hormigonado en climas cálidos son los siguientes:

1. La utilización de cementos con una alta finura de molido.
2. El uso de hormigones de altas resistencias con altos contenidos de cemento.
3. El diseño de secciones estructurales estrechas y con una cuantía grande de acero de refuerzo.
4. Necesidades económicas de continuar los trabajos de hormigonado en ambientes muy cálidos.

2.3 EFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE LAS PROPIEDADES DEL HORMIGÓN

Los problemas del hormigón preparado a altas temperaturas ambientales (35 a 40 °C) son consecuencia fundamentalmente de dos fenómenos diferentes, uno tecnológico y otro físico-químico.

El problema de carácter tecnológico está ligado con la relación agua/cemento (limitado en la normativa EHE): es evidente que en condiciones de elevada temperatura la demanda de agua es mucho mayor durante la fabricación y también para la conservación de la consistencia, (es muy frecuente añadir agua cuando se procede a la colocación del hormigón “retempering” en inglés).

El otro factor importante que hay que destacar y que explica en términos microestructurales la falta de capacidad de desarrollo de las resistencias mecánicas a medianas edades (de 7 a 28 días de curado) cuando la temperatura del sistema supera los valores estándar, está ligado a la cinética de las reacciones de hidratación. La velocidad de las reacciones es mucho mayor, con lo que la formación del gel C-S-H (producto mayoritario de hidratación) se acelera, lo que a su vez atenúa de forma considerable el potencial reactivo del cemento en lo que respecta a la formación de silicatos cálcicos hidratados. Las resistencias iniciales aumentan considerablemente cuando se incrementa la temperatura de curado, pero el desarrollo de la resistencia final se ve afectado negativamente. [López de la Fuente y Palomo, 2004], [Mouret et al., 1997]

2.3.1 Propiedades afectadas en estado fresco

A continuación se explican algunas de las propiedades del hormigón en estado fresco que están afectadas por la temperatura ambiental. Cabe mencionar que entre todas, estas propiedades son las que mayor interés tienen considerando el alcance de este trabajo.

Trabajabilidad y pérdida de trabajabilidad

Según [Soroka, 1993], la trabajabilidad del hormigón puede ser definida como “la propiedad que determina el esfuerzo necesario para manipular cierta cantidad de hormigón en estado fresco con una mínima pérdida de homogeneidad”. En esta definición el término “manipular” se refiere a todas las operaciones relacionadas con el manejo del hormigón fresco, tales como el transporte, la colocación, la compactación, el curado y en algunos casos el acabado. En otras palabras, la trabajabilidad es aquella propiedad que hace al hormigón fresco más manejable sin tener el riesgo de segregación.

La consistencia del hormigón fresco está controlada por la cantidad de agua adicionada a la mezcla, la cual a su vez depende de muchos factores tales como las

propiedades de los áridos (forma de partículas y distribución de tamaños, textura superficial y angularidad), la cantidad y finura del cemento utilizado y la presencia o no de aditivos.

Por otro lado, la temperatura juega un papel muy importante en la trabajabilidad del hormigón, es bien sabido que bajo condiciones de clima cálido, se requiere una mayor cantidad de agua para una determinada consistencia o asentamiento. Por ejemplo [Soroka, 1993], basado en datos experimentales indica que un aumento de 10 °C en la temperatura del hormigón tiene como consecuencia la disminución en el asentamiento inicial de aproximadamente 25 mm; de igual forma, por cada 10 °C de aumento en la temperatura del hormigón, se necesitarán de 4 a 6 kg/m³ de agua para mantener un mismo asentamiento. El efecto de la temperatura en la demanda de agua es principalmente producido por su efecto en la velocidad de la hidratación del cemento y también en la tasa de evaporación del agua.

Es necesario aclarar la diferencia entre la trabajabilidad y la pérdida de trabajabilidad. El asentamiento o índice de trabajabilidad deber ser determinado lo más pronto posible después del amasado del hormigón. El hormigón en estado fresco se va rigidizando con el tiempo y perdiendo trabajabilidad; este fenómeno es conocido como “pérdida de trabajabilidad”. La pérdida de trabajabilidad es producida por la hidratación del cemento, evaporación del agua de amasado y la absorción de los áridos de esta agua. La actuación conjunta de estos efectos junto con el hecho de que la formación de los productos de hidratación consume parte del agua de la mezcla, tendrán como resultado una pérdida de agua libre, que se manifestará finalmente en la reducción del efecto lubricante del agua en el hormigón.

Tiempos de fraguado

El fraguado del hormigón se define como la aparición de rigidez en el hormigón fresco y precede a la ganancia de resistencia del hormigón, que continúa durante largo tiempo si se presentan las condiciones favorables. Por lo tanto, se refiere a un estado de transición entre la fluidez y la rigidez. [Neville, 1999]

Los procesos de fraguado y posterior endurecimiento de la pasta de cemento, tienen lugar a través de las reacciones de hidrólisis e hidratación de sus componentes. Para que estos procesos tengan lugar es imprescindible la presencia de agua, sobre la cual actúan fuerzas físicas de adsorción y capilaridad, y fenómenos químicos de hidrólisis e hidratación.

Los fenómenos de hidrólisis e hidratación, como en toda reacción química, dependen entre otros factores, de la concentración y de la temperatura. Cuando la temperatura es elevada, tiene lugar una disminución del agua libre presente en la masa del hormigón, ya que al fenómeno de absorción y mojado de la arena y áridos se suma la fuga de la misma por capilaridad, con lo que la relación agua/cemento es menor a la

teórica (aumento de la concentración de sólidos) y los procesos de cristalización de los productos de reacción se verán acelerados.

Por otra parte, la velocidad de cualquier reacción química es tanto mayor cuanto más alta sea la temperatura a la que ésta tiene lugar. Así, a 35 °C el endurecimiento es casi dos veces más rápido que a 20 °C, temperatura que se acostumbra a tomar como referencia. [Código Modelo CEB-FIP, 1990]

En algunos estudios hechos sobre los tiempos de fraguado inicial y final del hormigón en función de variables como la temperatura ambiental, la humedad relativa y la velocidad del viento, se encuentra que el incremento de temperatura y velocidad del viento aceleran el fraguado inicial y final del hormigón, de igual forma, un incremento en la humedad relativa tiene un efecto retardante en los fraguados inicial y final del hormigón. [Ahmadi, 2000]

Retracción plástica y fisuración

Consecuencia directa de la mayor temperatura hemos visto que es la evaporación de parte del agua de amasado y la aceleración de los procesos de fraguado e hidratación; pero a su vez, como son procesos exotérmicos, tiene lugar un desprendimiento de calor que será tanto más rápido cuanto más rápidas sean estas reacciones, con lo que a la temperatura de la masa del hormigón habrá que sumarle la debida al calor de hidratación.

El calor de hidratación de 1 kg de cemento es de unos 400 a 500 kJ (100 a 120 kcal), lo cual supone que en una dosificación típica de hormigón, y si no hubiese ninguna pérdida de calor, la temperatura del mismo se puede elevar considerablemente.

Como la conductividad térmica del hormigón es muy baja, este calor se acumula en su interior, elevando su temperatura. Si la temperatura exterior desciende (cambio de las condiciones climáticas, paso del día a la noche, etc.) y el gradiente de temperatura es importante, es muy probable la aparición en la superficie de fisuras de origen térmico.

La retracción plástica es un fenómeno característico del hormigón fresco, motivado por la tensión capilar del agua en el interior de los poros y que tiene lugar durante las primeras horas después de amasado el hormigón. Es frecuente su presencia en losas de gran superficie, y suele coincidir su aparición con el momento en el que desaparece el brillo de la superficie húmeda del hormigón por la evaporación del agua.

Si por las razones que sean, la pérdida de agua en la superficie excede de la cantidad aportada por la exudación, se invierten las fuerzas capilares en el interior de los poros, y se produce un vacío en la masa del mismo. Durante este proceso, si la disminución de volumen está coaccionada en zonas próximas a la superficie por donde ha tenido lugar la evaporación del agua, bien sea por el árido grueso, bien por las

armaduras o el encofrado, al estar el hormigón en estado fresco y no tener ninguna resistencia, la probabilidad de que se fisure es muy elevada.

Aunque la fisuración debida a la contracción plástica se desarrolla a temperaturas normales, a elevadas temperaturas se puede tener una amplificación de los efectos en este fenómeno. La temperatura del aire, la humedad relativa y la velocidad del viento afectan a las propiedades de hormigón en estado fresco y endurecido. Una temperatura elevada y una baja humedad relativa (o la combinación de ambas) acelera la retracción plástica del hormigón y si esta retracción está impedida se produce fisuración. [Almusallam, 2001]

2.3.2 Propiedades afectadas en estado endurecido

A continuación se explican algunas de las propiedades del hormigón en estado endurecido que son afectadas por la temperatura ambiental. Cabe mencionar que entre todas, estas propiedades son las que mayor interés tienen considerando los alcances de este trabajo.

Resistencia mecánica

Una elevada temperatura, una baja humedad relativa y una alta velocidad del viento, o la combinación de estos factores pueden ocasionar problemas durante la fabricación, colocación, compactación y curado del hormigón, de igual forma estas condiciones existentes en climas cálidos pueden también afectar al comportamiento del hormigón en estado endurecido.

Las propiedades del hormigón en estado endurecido que están afectadas más radicalmente por estos factores son: el desarrollo de la resistencia a compresión y la estructura porosa. Varios estudios en este sentido, indican que las condiciones de contorno en climas cálidos aceleran la resistencia del hormigón a edad temprana, mientras que la resistencia a edades posteriores tiende a disminuir. [Almusallam, 2001], [Mustafa y Yusof, 1991]

La resistencia del hormigón viene determinada por:

1. La resistencia de la pasta de cemento.- la resistencia de la pasta es muy significativa y los factores que tengan efectos sobre ésta, también tendrán efectos sobre la resistencia del hormigón; el más importante de estos factores es la relación agua/cemento.
2. La resistencia de la interfase pasta-árido.- depende de la resistencia de la pasta, esto es, de la relación agua/cemento, y de las propiedades de los áridos.
3. Las propiedades de los áridos.- generalmente, la aspereza de la superficie de los áridos (textura), tiene efectos benéficos sobre la interfase pasta-árido, lo cual

también aumenta la resistencia. La composición química y mineralógica de los áridos puede ser también un factor de influencia en la resistencia de la interfase. La resistencia del hormigón disminuye cuando se utilizan áridos gruesos, y aumenta cuando la rigidez de éstos en su conjunto es mayor (mayor compacidad del esqueleto granular), es decir, su módulo de elasticidad.

La temperatura tiene efectos sobre la resistencia del hormigón sobre (i) la velocidad de hidratación, (ii) la naturaleza de la estructura del hormigón y (iii) la velocidad de evaporación y el resultante secado del hormigón. Generalmente, debido al incremento en la velocidad de hidratación, la temperatura acelera la ganancia de resistencia a edades tempranas, sin embargo, la resistencia a edades posteriores será perjudicada. Lo anterior es debido a que bajo temperaturas elevadas la porosidad de la pasta de cemento es mayor y menos uniforme. [Soroka, 1993]

Algunos estudios experimentales han tratado de demostrar estas suposiciones, por ejemplo, [Mouret et al., 2003] realizaron un estudio enfocado a los efectos del incremento de la temperatura de los constituyentes del hormigón en la resistencia de éste (medida en probetas de control) y principalmente en la influencia del incremento de la temperatura de los áridos debida a la radiación solar.

Principalmente buscaban determinar si la adición de agua es la responsable de la pérdida de resistencia, la cual podría estar relacionada con la modificación de la relación agua/cemento, o bien, si eran las variaciones en las cinéticas de hidratación debidas a las condiciones térmicas. Si resultara ser cierta la primera causa, entonces se confirma que las recomendaciones básicas para hormigonado en verano son suficientes, pero si no, se tendrán que estudiar más a fondo otros fenómenos asociados a la formación de la microestructura.

Las conclusiones obtenidas en este estudio fueron las siguientes:

- No existen efecto de la temperatura del cemento en la resistencia del hormigón.
- La resistencia es independiente de cómo el incremento de la temperatura del hormigón es alcanzado.
- Un incremento en la temperatura inicial de la mezcla resulta en una pérdida de trabajabilidad.
- Si la consistencia de la mezcla es mantenida por medio de adición de agua, se observa una reducción en la resistencia, la cual es explicada mediante un incremento de la porosidad del hormigón debido al incremento de la relación agua/cemento o al incremento del contenido de aire.
- Desde un punto de vista práctico, este estudio confirma que las recomendaciones básicas para hormigonado en verano son parcialmente suficientes y justificadas.
- Por otro lado, se encontró que el aumento en la dosificación de aditivo reductor de agua es ciertamente una buena solución con el objeto de adaptar el diseño de la mezcla a las condiciones de verano.

Otro estudio interesante desde el punto de vista del efecto de la temperatura de curado no isotérmica sobre la resistencia mecánica del hormigón es el realizado por [Kim et al., 1998]. En este estudio experimental se investigó el desarrollo de resistencia para varias condiciones de curado (variables con el tiempo) a 5, 20 y 40 °C, durante los primeros 3 días después de su fabricación. Con posterioridad, las probetas se curaron a 20 °C hasta los 28 días.

En los resultados se observó, en línea con lo ya conocido, que los hormigones expuestos a una alta temperatura inicial (40 °C) alcanzan una alta resistencia inicial pero finalmente una menor resistencia a largo plazo. Por el contrario, los especímenes de hormigón expuestos a una baja temperatura inicial (5 °C) tienen una baja resistencia inicial pero casi las mismas o mayores resistencias a largo plazo que los hormigones curados a 20 °C. Por otro lado, la variación de temperatura de curado parece ser efectiva dentro de los 3 primeros días después de fabricación, para la resistencia a largo plazo. En este sentido, las variaciones de la temperatura de curado posteriores a los primeros 3 días después de la fabricación parecen no tener consecuencias significativas sobre la resistencia.

Durabilidad

La durabilidad puede definirse como la capacidad del hormigón para resistir los efectos nocivos de los factores ambientales y funcionar satisfactoriamente bajo condiciones de servicio. [Soroka, 1993] Dotar al hormigón de la durabilidad adecuada en ambientes agresivos no es una tarea fácil y requiere de atenciones especiales a ciertos detalles durante las etapas de diseño y producción del hormigón. Esta situación es particularmente significativa en condiciones de climas cálidos, donde los factores ambientales pueden agravar el problema y dificultar que el hormigón tenga la calidad requerida.

La durabilidad del hormigón está en función de algunos agentes agresivos y procesos determinados, y sus efectos sobre el hormigón pueden ser acrecentados por la influencia de la temperatura. Entre estos agentes podemos mencionar los siguientes:

Permeabilidad

La temperatura tiene efectos sobre la porosidad del hormigón, tanto, sobre el tamaño de los poros como sobre la distribución de éstos. La exposición a altas temperaturas de un cemento en estado de hidratación produce un sistema poroso más grueso. Debido a que la permeabilidad está determinada por la porosidad del sistema, la permeabilidad puede ser incrementada en función de la temperatura. Por otro lado, la permeabilidad también está determinada por la relación agua/cemento, en el sentido de que a mayor relación agua/cemento la permeabilidad será mayor, teniendo consecuencias negativas sobre la durabilidad.

Ataque por sulfatos

La vulnerabilidad de un hormigón a sufrir deterioro por ataque de sulfatos viene determinada por la composición del cemento, el contenido de cemento, la relación agua/cemento, la presencia de adiciones minerales como puzolanas y la temperatura. Como se ha visto, las reacciones químicas son aceleradas considerablemente por efecto de la temperatura. Por lo tanto, es de esperarse que la intensidad de un ataque por sulfatos sea incrementada por efecto de la temperatura.

Reacción álcali-árido

Los áridos normales, casi siempre suelen ser inertes cuando se encuentran dentro de un medio de agua-cemento. Sin embargo, algunos áridos pueden contener componentes reactivos que, en presencia del agua, pueden reaccionar con los álcalis del cemento o de alguna fuente externa. Como consecuencia, el hormigón sufre expansiones que naturalmente causaran severos daños y deterioros al hormigón y a las estructuras en funcionamiento. La más común de las reacciones de este tipo tiene que ver con materiales silíceos reactivos a los álcalis del cemento, lo cual se denomina reacción álcali-sílice. El efecto de la temperatura en este mecanismo de deterioro del hormigón consiste en acelerar la velocidad de la reacción álcali-árido. La intensidad de este tipo de reacciones será más intensa y dañina en regiones cálidas, y aún más en regiones húmedas (con una humedad relativa de 85% o más).

2.4 FACTORES ASOCIADOS AL PROBLEMA Y SU INFLUENCIA EN LAS PROPIEDADES DEL HORMIGÓN

En esta sección se mencionarán los principales factores que tienen relación directa con la problemática del hormigonado en climas cálidos y con la disminución de las propiedades del hormigón en estado fresco y endurecido. Estos factores tienen que ver con aspectos naturales (medioambientales), con las propiedades y temperatura de los constituyentes del hormigón y con la del propio hormigón, con aspectos industriales y de producción y con el factor humano.

2.4.1 Parámetros térmicos ambientales.

Los parámetros climáticos que en general interesa considerar en el tipo de problema planteado de esta tesis son la temperatura ambiente, la radiación solar y la velocidad del viento.

Temperatura ambiente

En el pasado, la temperatura máxima permisible a la que el hormigón podía ser colocado estaba limitada. Sin embargo, esta no es una restricción razonable para zonas geográficas donde las temperaturas ambientales son muy altas. Por ejemplo, la Norma Europea ENV 206:1992 limita la temperatura de colocación del hormigón a 30 °C. Además, según [Neville, 1999], afirma que en la medida de lo posible, es deseable colocar el hormigón durante la parte más fría del día y preferiblemente al tiempo en el cual la temperatura ambiente subirá después del fraguado del hormigón, esto es, después de medianoche o en las primeras horas de la mañana.

La temperatura máxima del hormigón está limitada por una serie de razones para prevenir daños al hormigón. Ciertos estudios demuestran que la durabilidad a largo plazo se deteriora si la temperatura máxima después de la colocación excede el rango de 68 a 74 °C. El principal mecanismo de daño es el DEF (delayed ettringite formation - formación retardada de etringita), el cual puede causar expansiones internas y la fisuración del hormigón, pudiendo ser evidente hasta después de algunos años. Otras razones para limitar la temperatura máxima del hormigón tienen que ver con la retracción plástica, expansión térmica y reducción de resistencias mecánicas.

La diferencia de temperatura máxima permitida, entre la parte de mayor temperatura del hormigón y la superficie de éste, debe ser controlada con el objeto de minimizar la posible fisuración térmica; esto sucede cuando las contracciones debidas al enfriamiento de la superficie provocan tensiones tractivas que superan la resistencia a tracción del hormigón, sobre todo a primeras edades. La diferencia de temperatura máxima permitida está en función de las propiedades mecánicas del hormigón, tales como la expansión térmica, la resistencia a tracción y el módulo de elasticidad, así como del tamaño y restricciones existentes en el elemento estructural. [Gajda y Vangeem, 2002]

Radiación solar

La radiación solar es uno de los factores climatológicos que muestra una gran influencia sobre la respuesta térmica de las estructuras de hormigón. Cualquier material expuesto a la intemperie en horas diurnas, gana energía calorífica como resultado de la radiación solar que incide sobre su superficie. Durante la noche, tiene lugar una pérdida de la energía calorífica almacenada por el material debido a la re-radiación emitida por éste hacia los alrededores.

Este fenómeno puede afectar a los áridos cuando se almacenan a la intemperie y al mismo tiempo, al hormigón en estado fresco y en edades muy tempranas. Estos materiales se comportan como “cuerpos grises” ya que absorben parte de la radiación solar incidente. Así, la cantidad de energía calorífica absorbida por un material depende de su coeficiente de absorción solar.

Los efectos de este parámetro sobre los áridos resultan en un incremento de su temperatura, lo que a su vez supondrá problemas al hormigón en sus dos facetas (fresco y endurecido). Respecto al efecto de la radiación solar sobre el hormigón en estado fresco y en edades muy tempranas, tiene repercusiones negativas ya que, asimismo, incrementa la temperatura de éste, ocasionándole una excesiva evaporación de agua y los daños adicionales que se han mencionado.

Una función utilizada por diversos investigadores [Calmon, 1995], es aquella que relaciona la radiación solar total diaria sobre superficie horizontal, W , y la duración del día solar T_0 . La intensidad de radiación solar incidente en el instante ‘ t ’ puede obtenerse mediante la siguiente expresión:

$$I(t) = \frac{2W}{T_0} \operatorname{sen}^2\left(\frac{\pi \cdot t}{T_0}\right)$$

La aplicación de esta ecuación es válida para aquellos casos en los que se dispone de medidas experimentales de radiación solar y número de horas de sol.

La temperatura de los áridos puede ser controlada a tal grado de evitar la radiación solar directa sobre ellos. La temperatura de los áridos expuestos directamente al sol se incrementa aproximadamente 4 a 5 °C comparada con la de los áridos a la sombra. [Nambiar y Krishnamurthy, 1984] Su temperatura ocasiona el efecto más pronunciado sobre la temperatura del hormigón. Es por eso que muchas veces se recomiendan algunas acciones como poner a la sombra o rociar con agua los acopios de áridos inmediatamente antes de utilizarlos. [Mouret et al., 2003], [Turton, 1995], [Kay y Slater, 1995], [Goeb, 1986], [Malisch, 1990], [Lee, 1989], [Schrader, 1987]

Durante la noche, los áridos y el cemento no se enfrían tan rápido como el agua, por lo que es incorrecto asumir que su temperatura será igual a la ambiental en un

momento dado. En este sentido, habrá que calcular su temperatura en función de sus coeficientes de inercia térmica y de la evolución de la temperatura ambiental en función del tiempo.

Velocidad del viento

La velocidad del viento afecta a las propiedades del hormigón en estado fresco, bajo el mecanismo principal de la evaporación del agua del hormigón. Posteriormente este efecto tiene consecuencias sobre las propiedades del hormigón en estado endurecido, principalmente sobre la resistencia mecánica y la durabilidad, ya que la hidratación del cemento no es completa, lo que disminuye las propiedades mecánicas y la impermeabilidad. La **figura 2.2** muestra la magnitud de agua evaporada en función de la temperatura del hormigón, la humedad relativa ambiental y la velocidad del viento.

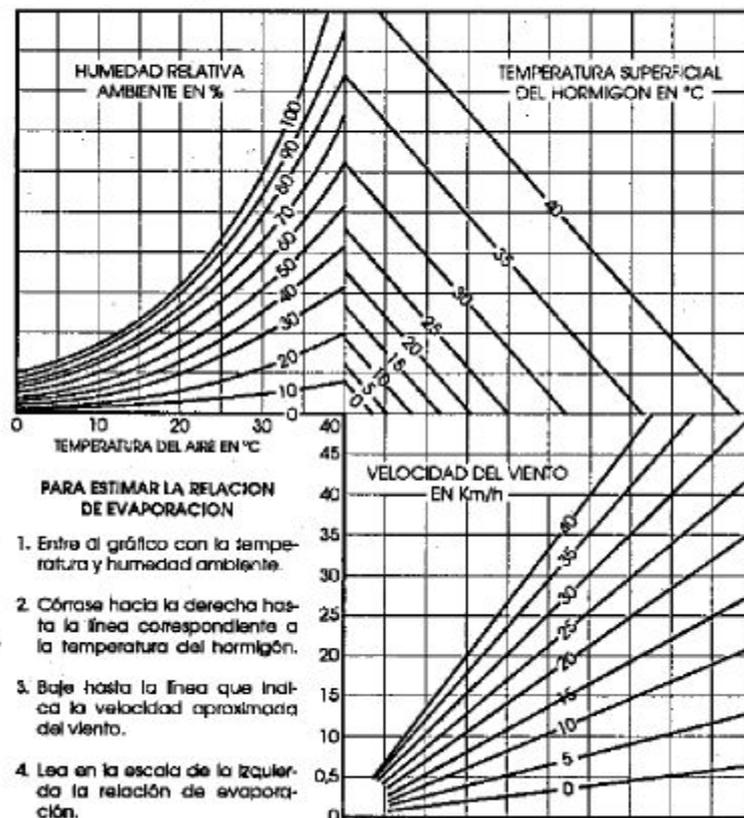


Figura 2.2.- Evaporación del agua superficial del hormigón [ACI Committee 305, 1991]

2.4.2 Temperatura de los principales constituyentes del hormigón

A continuación, se analizan por separado la influencia que la temperatura de cada constituyente tiene sobre el comportamiento del hormigón.

Temperatura del cemento

El cemento representa alrededor del 15% de la masa del hormigón en peso. 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.

La temperatura del cemento (corroborado en laboratorio y en obra) no presenta un efecto significativo en las propiedades de los hormigones. Debido a su bajo calor específico y a su relativa baja proporción en las mezclas, presenta un efecto reducido en la temperatura del hormigón, en este caso la temperatura de los áridos y del agua de amasado presenta mayor incidencia que el cemento.

Temperatura de 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. La **figura 2.3** muestra el efecto de la temperatura de los áridos en la temperatura final del hormigón; en ella puede verse que la temperatura de los áridos es la que mayor influencia tiene en la temperatura final del hormigón.

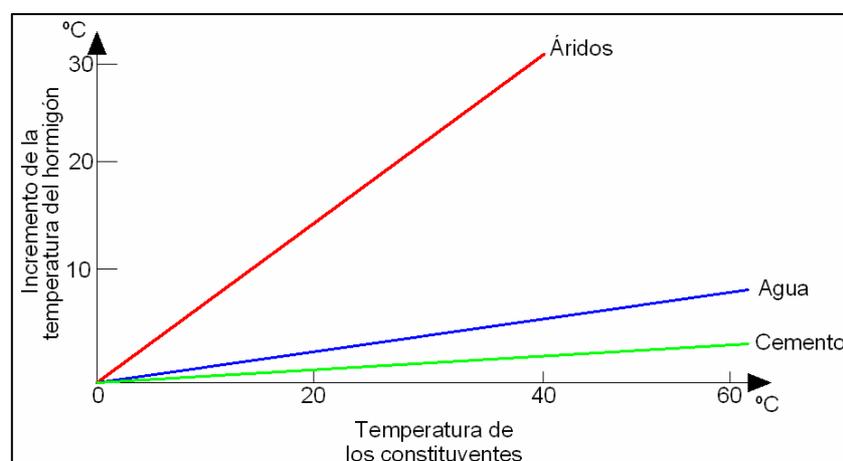


Figura 2.3.- Incremento de la temperatura del hormigón en función de la de sus constituyentes [www.infociments.fr]

Temperatura del agua

El agua representa alrededor del 7,5% de la masa del hormigón en peso. 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, aunque solo es aplicable en casos muy específicos, ya que los costes se incrementan.

Respecto a la influencia de la temperatura del agua en las propiedades del hormigón fresco y endurecido, [Jacomel de Mattos, 2003] trata un tema de importancia industrial al abordar la problemática de una empresa al utilizar un mismo tipo de hormigón en dos regiones de distinta climatología sin haber obtenido éxito, ya que en la región más cálida normalmente se adiciona más agua para obtener una mayor consistencia teniendo al final una resistencia menor. El trabajo estudia experimentalmente la influencia de la temperatura del agua de amasado en las propiedades del hormigón fresco y endurecido, desde una perspectiva informativa para los ingenieros y los profesionales del área, a través de campañas experimentales hechas con pasta de cemento, mortero y hormigón. La temperatura del agua se manejó en rangos desde 5 hasta 40 °C, en intervalos de 5 °C.

En los resultados, la temperatura del agua no tiene influencia en la consistencia de la pasta de cemento ni en la del mortero. Asimismo la temperatura del agua de amasado sí tiene influencia en la trabajabilidad del hormigón, siendo esta inversamente proporcional al asentamiento. Encontró también que cuando la relación agua/cemento es mayor, el efecto de la temperatura del agua en la trabajabilidad es menos marcado, sin embargo las trabajabilidades en este caso son mayores, asimismo a mayores consumos de cemento se tienen trabajabilidades menores. Por último, la influencia de la temperatura del agua sobre la resistencia a compresión no es significativa para cualquier edad del hormigón.

Una vez analizados los resultados de este estudio, resulta sin embargo poco viable la implementación de un sistema de enfriamiento de agua, debido a que este constituyente del hormigón tiene un calor específico igual a la unidad, lo que resulta que la permanencia de la temperatura, una vez reducida, será muy corta. En este sentido parece ser que la mejor opción es llevar a cabo el enfriamiento de los áridos, al ser éstos los que mayor proporción presentan en el hormigón.

2.4.3 Temperatura inicial del hormigón

La temperatura inicial del hormigón es un factor principal para el posterior desarrollo de la temperatura máxima de su masa. En este sentido, cuando la temperatura inicial del hormigón sea mayor, mayor será su máxima temperatura. Por lo tanto, es

esencial lograr una temperatura inicial del hormigón mínima. [Nambiar y Krishnamurthy, 1984]

La temperatura inicial del hormigón fresco ‘ T_i ’ puede ser calculada mediante la siguiente fórmula:

$$T_i = \frac{0,22(T_a W_a + T_c W_c) + T_w W_w}{0,22(W_a + W_c) + W_w}; \text{ donde}$$

- T_i = temperatura inicial del hormigón (°C)
- T_a = temperatura de los áridos (°C)
- W_a = dosificación total de los áridos (kg/m³)
- T_c = temperatura del cemento (°C)
- W_c = dosificación total de cemento (kg/m³)
- T_w = temperatura del agua de amasado (°C)
- W_w = dosificación total de agua de amasado (kg/m³)

El valor de 0,22 es la relación aproximada entre el calor específico de los constituyentes del hormigón y el calor específico del agua. En realidad, la temperatura inicial del hormigón será un poco mayor que la calculada mediante esta ecuación debido a la energía mecánica del proceso de amasado del hormigón.

2.4.4 Contenido y tipo de cemento

Cuando el cemento Portland es mezclado con agua se libera calor, este calor es llamado calor de hidratación y 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 dentro del hormigón.

El segundo factor más importante desde el punto de vista de generación de calor del hormigón es la cantidad de cemento por unidad de volumen, en este caso, si se utiliza menor cantidad de cemento, el calor desarrollado por el hormigón será menor. [Nambiar y Krishnamurthy, 1984]

Los materiales constituyentes del hormigón pueden ser seleccionados para minimizar o maximizar el calor de hidratación dependiendo de cada necesidad. Cementos con altos contenidos de silicato tricálcico (C₃S) y aluminato tricálcico (C₃A), así como de una alta finura como el cemento Tipo III (ASTM) tienen tasas de generación de calor más altas que otros cementos. Químicamente, el C₃S y el C₃A generan más calor y más rápido que el silicato dicálcico (C₂S) o cualquier otro constituyente del cemento.

Una alta finura presenta una mayor superficie específica a ser mojada, lo que resulta en una aceleración de la reacción química entre el cemento y el agua, lo que a su vez ocasiona una mayor liberación de calor a edades tempranas.

Otros factores que tienen influencia en el desarrollo de calor del hormigón son el contenido de cemento, la relación agua/cemento, las temperaturas de fabricación, colocación y curado, la presencia de aditivos químicos y adiciones minerales y las dimensiones del elemento estructural. [Portland Cement Association, 1997]

El calor de hidratación 'H' de un cemento puede ser teóricamente calculado con cierto grado de precisión mediante la siguiente fórmula, si los contenidos de C₃S, C₂S, C₃A y C₄AF (en porcentaje de masa) son conocidos:

$$H = 136 \cdot C_3S + 62 \cdot C_2S + 200 \cdot C_3A + 30 \cdot C_4AF \text{ \{cal/g\}}$$

Para ilustrar la influencia del contenido y tipo de cemento en las propiedades del hormigón fabricado en climas cálidos, a continuación se hace referencia a una investigación realizada por [Palomo et al., 2000], orientada al estudio microestructural de dos cementos, que poseyendo idéntica composición química pero diferente superficie específica, fueron sometidos a sendas hidrataciones y curados a 20 y 40 °C. En este estudio se hizo el seguimiento de la evolución del calor de los primeros momentos de la hidratación de los cementos por medio de la técnica de calorimetría de conducción. Adicionalmente se hizo un seguimiento de la evolución mecánica de los materiales a 3, 7 y 28 días y un estudio de la evolución microestructural de estos por medio de la microscopía electrónica de barrido y la porosimetría de mercurio.

Los resultados de la investigación indican que la evolución microestructural de los cementos con el tiempo, es diferente dependiendo de la temperatura de curado. Dichas diferencias pueden explicar el comportamiento mecánico observado en los materiales. Las principales conclusiones extraídas de este estudio son las siguientes:

- La temperatura de hidratación de los cementos afecta a la velocidad y a la intensidad de las reacciones (a mayor temperatura mayor liberación de calor en menor tiempo), al desarrollo microestructural de los cementos y consecuentemente a su evolución mecánico-resistente.
- Por efecto de la temperatura elevada los cementos experimentan un alto grado de hidratación a primeras edades con una deposición densa y compacta de fases hidratadas en torno de los granos de clínker anhidros y una drástica reducción del tamaño medio de los poros; dicha microestructura evoluciona poco con el tiempo (hasta los 28 días).
- La superficie específica de los cementos afecta también a su evolución calorífica, resistente, microestructural, etc.: cuanto más fino es el material, más rápido reacciona y más rápido alcanza sus prestaciones mecánicas óptimas.

2.4.5 Contenido y tipo de aditivo

En condiciones de altas temperaturas ambientales, la utilización de aditivos químicos será de gran ayuda para obtener una adecuada trabajabilidad y mantenerla el mayor tiempo posible, evitar problemas asociados como fisuración y, por supuesto, reducción en las características mecánicas y de durabilidad.

La utilización de aditivos retardantes, reductores de agua, simples o de alta actividad, no resuelve de todo el problema. Diversas fuentes afirman incluso que los aditivos retardantes-reductores o simplemente reductores de agua, se comportan a estas temperaturas como aceleradores de fraguado, con lo que directamente se consigue rebajar la relación agua/cemento; sin embargo, no se consigue un comportamiento mecánico adecuado, pues al final siempre hay que aumentar la cantidad de cemento respecto a las dosificaciones de trabajo de los meses con temperaturas más bajas.

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).

En condiciones de clima cálido, el efecto acelerador que la temperatura tiene sobre la pérdida de trabajabilidad del hormigón puede ser superado utilizando una mayor cantidad de agua que en condiciones estándar. No obstante, este aumento en la cantidad de agua no es del todo deseable y puede ocasionar efectos secundarios en el hormigón como la segregación y el sangrado. En este sentido, una opción viable y muy utilizada es la utilización de aditivos reductores de agua.

La utilización, por otro lado, de aditivos superplastificantes se ha hecho común en los últimos años. Este tipo de aditivos tiene un efecto mucho más importante sobre la consistencia del hormigón que los tradicionales reductores de agua, sin tener ningún efecto colateral sobre las propiedades del hormigón, como por ejemplo segregación o sangrado. De igual forma, como la relación agua/cemento no es modificada, se pueden tener resistencias más altas. Sin embargo, debe considerarse que el efecto de los superplastificantes en la consistencia del hormigón tiene poca duración, durando en promedio entre 30 y 60 minutos después de adicionarse a la mezcla, aún en condiciones térmicas moderadas; este tiempo obviamente será menor a mayores temperaturas. Por lo visto, ahora existen nuevos tipos de superplastificantes que tienen un efecto más duradero y por lo tanto, presentan un comportamiento más adecuado en climas cálidos.

Según [Corradi et al., 2004], recientes estudios de mercado indican que la industria del hormigón preparado actualmente requiere las siguientes características de los aditivos químicos:

- Reducir el agua necesaria en el hormigón para mejorar la durabilidad.
- Hacer que el hormigón tenga una hidratación más rápida con el objeto de tener un rápido desarrollo de resistencia y así acelerar el proceso constructivo.
- Asegurar que el hormigón permanezca trabajable el tiempo suficiente para ser transportado y colocado.
- Controlar la reología del hormigón con el objeto de facilitar las tareas de vaciado y colocación.

Es difícil crear un aditivo que reúna todos estos requerimientos simultáneamente. Una alta reducción de agua causa que las partículas de cemento estén unas muy cerca de las otras, lo que ocasiona que el hormigón pierda trabajabilidad muy rápidamente. Una permanencia larga en la trabajabilidad requiere la adición de agua extra. Parece ser que solamente mediante la utilización de los aditivos químicos, podremos reunir estas dos características deseables simultáneamente, es decir, tener un control de permanencia de la trabajabilidad y una reducción en la relación agua/cemento.

2.4.6 Propiedades físicas de los áridos

Los áridos constituyen aproximadamente el 80% del volumen de un hormigón; por lo tanto sus características influirán de una forma decisiva en las propiedades y en el comportamiento de éste. El tamaño máximo, la forma y la granulometría del árido son tres de los factores que mayor influencia tienen sobre la cantidad de agua necesaria para alcanzar una determinada consistencia. [Dilek y Leming, 2004] Actuar sobre los mismos evitará tener que aumentar la cantidad de agua de amasado en tiempo caluroso, con sus perniciosos efectos sobre las resistencias mecánicas finales.

La naturaleza de los áridos también juega un papel importante en el comportamiento del hormigón frente a las altas temperaturas debido a que los áridos de tipo calizo tienen mayor poder de retención de agua que los silíceos, con lo que pueden aportarla al subir la temperatura. [Fernández Canovas, 1996]

En muchas ocasiones es posible que no se encuentre disponible un árido de características apropiadas para el hormigón en climas cálidos, o que su empleo sea poco económico. No obstante, siempre es factible adaptar las características de los áridos disponibles para mejorar en lo posible su comportamiento en este tipo de situaciones extremas. [Vaquero, 2003]

Algunas propiedades físicas de los áridos son de gran importancia y repercuten de forma directa sobre el posterior comportamiento del hormigón, por ejemplo el contenido de humedad y la absorción.

Dado que la absorción representa el agua contenida por un árido cuando su condición es de saturado y seco en superficie, se puede definir el contenido de humedad de dicho árido, como el agua en exceso sobre su condición anterior. Así pues, el contenido total de agua de un árido se identifica como la suma del agua absorbida y su humedad. Debido a la capacidad de absorción de los áridos, la influencia del estado de humedad de éstos en las propiedades del hormigón fresco y endurecido tiene gran interés desde el punto de vista industrial.

[Poon et al., 2004], realizaron un estudio en el cual investigaron la influencia de los estados de humedad de los áridos (secado al aire-SA, secado en horno-SH y saturado y superficie seca-SSS), en las propiedades del hormigón en estado fresco y endurecido en diferentes proporciones. En sus consideraciones experimentales mantuvieron la relación agua (libre)/cemento constante en todas las mezclas y se midió la pérdida de trabajabilidad y la resistencia a compresión a 3, 7 y 28 días.

En los resultados, el valor inicial del asentamiento dependía del contenido de agua inicial, y la pérdida de trabajabilidad del contenido de humedad de los áridos. La pérdida de trabajabilidad resultó ser más significativa cuando se utilizaban áridos SA o SH, debido a la absorción de agua por el árido seco, que reduce rápidamente la cantidad de agua libre en la mezcla.

En relación a los resultados de resistencia a compresión, los valores obtenidos para los hormigones fabricados con áridos SA y SSS fueron muy similares; los valores más bajos fueron obtenidos utilizando áridos SH. La explicación que dieron a estos resultados fue la siguiente: es bien sabido que la resistencia del hormigón depende de la resistencia de la matriz cementante, los áridos y la interfase matriz-árido. La diferencia en la resistencia desarrollada por los hormigones fabricados con áridos SH puede tener relación con el desarrollo de esta interfase matriz-árido. En este sentido, el hecho de que la resistencia alcanzada por el hormigón elaborado con áridos SH que con áridos SSS sea menor, se debe a que en el primer caso, la relación agua/cemento es mayor debido a un mayor contenido inicial de agua libre.

2.4.7 Propiedades térmicas de los áridos

Tanto el coeficiente de expansión térmica como el calor específico, la conductividad térmica y la difusión de calor en el hormigón están notablemente influenciados por las propiedades de los áridos. Se ha demostrado que cada uno de los componentes del hormigón contribuye a la conductividad térmica y al calor específico del mismo. [López Jimeno, 1994]

El coeficiente de expansión térmica de los áridos utilizados habitualmente en la fabricación del hormigón está relacionado con la composición mineralógica y con el contenido de cuarzo de la roca, de modo que un aumento en la cantidad de este mineral eleva el valor del coeficiente térmico de expansión.

Por otra parte, hay que indicar que la conductividad térmica varía con el peso específico del hormigón, de modo que en general, una mayor cantidad de árido provoca el aumento en el valor de la conductividad térmica.

Es recomendable utilizar áridos con menor coeficiente de dilatación térmica para limitar la fisuración por gradientes térmicos, ya que este valor determinará el valor final de la dilatación térmica del hormigón. [Vaquero, 2003]

2.4.8 Aspectos industriales y de producción

Existen muchos factores que afecta a la mezcla de hormigón fresco (desde el proceso de preparación en la planta hasta el vertido en la obra) y que producen variaciones en las propiedades del hormigón. Algunas de estas variables son prácticamente incontrolables y otras sólo carecen parcialmente de control.

Etapa de amasado

Los factores relacionados con los procesos de producción, logísticos y de construcción afectan las propiedades del hormigón en climas cálidos. En este sentido 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.

Etapa de transporte

La variación en la trabajabilidad del hormigón debido a la prolongación del tiempo de transporte y al retraso en la colocación es inevitable, sobre todo en climas cálidos y secos. Ni siquiera los nuevos aditivos reoplásticos han resuelto por completo el problema. Si se restaura la trabajabilidad por reamasado incontrolado, se pueden producir grandes variaciones en las propiedades del hormigón.

Durante el trayecto de la planta a la obra, el hormigón deberá ser agitado dentro del camión a las mínimas revoluciones posibles. De igual manera, 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.

Pérdida de asentamiento

La pérdida de asentamiento del hormigón se debe principalmente a la reacción del cemento con el agua. Ya que la creación de los productos resultantes captura parte del agua de la mezcla, en parte debido a las reacciones químicas y en parte debido al efecto físico de la adsorción sobre la superficie de los nuevos productos resultantes. Otros factores son la temperatura y la humedad relativa ambiente, la temperatura de las materias primas y de la hormigonera, y la temperatura resultante del hormigón. También es necesario tener en cuenta la pérdida de cierta cantidad de agua por evaporación y, en ciertos casos, por absorción de los áridos. Finalmente, la fragmentación de los áridos debido a la fricción los procesos de mezclado y agitación incrementa la temperatura del hormigón e incorpora un porcentaje más alto de partículas finas.

Una alta temperatura del hormigón tiene un efecto de aceleración sobre la velocidad de hidratación del cemento, y acelera también la velocidad de pérdida de asentamiento. Esto sugiere que con una reducción en la velocidad de hidratación del cemento (por ejemplo, añadiendo un aditivo retardante) sería posible disminuir la tasa de pérdida de asentamiento. En la práctica ocurre lo opuesto. Esto se ha demostrado en los trabajos de algunos autores como [Ravina, 1975], [Pérez Uceda, 1992], [Howland, 1997], utilizando diferentes marcas comerciales de aditivos químicos plastificantes y retardadores.

Por ejemplo, [Ravina, 1975] sugiere una explicación muy congruente para este tipo de contradicción. El efecto acelerador de estos aditivos se observó en ensayos en que el hormigón fresco se sometió a una agitación continua o periódica (como ocurre en el camión). Sin embargo, el tiempo de fraguado se establece normalmente con una muestra de hormigón que se mantiene en estado de reposo, de manera que el mecanismo retardante de estos aditivos se explica mediante dos teorías: la absorción de los aditivos sobre la superficie de los granos de cemento que obstruye su reacción con el agua circundante y la precipitación de una capa de sales de calcio insolubles sobre la superficie de estos granos de cemento. Parece razonable que el proceso de agitación, con su efecto abrasivo pueda eliminar de la superficie de los granos de cemento la capa de aditivos adsorbida o la capa de sales de calcio precipitadas y, por lo tanto, durante la mezcla continua a lo largo de un tiempo largo, el mecanismo de retardar el tiempo de fraguado falla y el aditivo actúa como un plastificante, que puede acelerar la velocidad de hidratación incluso una hora antes que la mezcla de hormigón de control (sin aditivos). Se hace énfasis en este efecto cuando el aditivo se utiliza con una dosis baja, como suele pasar en este caso.

Reemplazar parte del cemento Portland del hormigón con algún tipo de puzolana natural o artificial puede ser deseable en climas cálidos ya que estas adiciones, debido a un mecanismo que no se conoce por completo, reducen la tasa de pérdida de la tasa de asentamiento. Este fenómeno no se puede explicar solamente por la reducción del cemento en el hormigón, ya que si la adición se reemplaza por una arena muy fina la tasa de pérdida de asentamiento aumenta drásticamente.

Reamasado

El “reamasado” se define en [ACI Committee 116, 2000] como la “...adición de agua y remezclado del hormigón o mortero que ha perdido trabajabilidad suficiente, de manera que es imposible de colocar o utilizar...”. Tal vez esta definición sea incompleta, ya que la adición de aditivos químicos y el remezclar el hormigón para recuperar su facilidad de trabajo es una práctica muy común en el hormigón preparado y debe incluirse en la definición de “reamasado”.

Sabiendo bastante bien que cualquier adición de agua al contenido original previsto del diseño de mezcla incrementa la relación agua/cemento, el reamasado del hormigón es de hecho un procedimiento prohibido en casi todos los documentos normativos, ya que muchas investigaciones han probado su efecto pernicioso sobre las propiedades de durabilidad y mecánicas del hormigón. El reamasado del hormigón con agua se considera un procedimiento indeseable y es, sin embargo, a veces necesario. Por otro lado, cuando la definición se amplía al uso de aditivos, es importante tener presente (al menos para aditivos en fase líquida) su contenido total de agua.

La nueva norma europea [EN 206-1, 2000] establece que “...en general cualquier adición de aditivos o de agua está prohibida durante la entrega del hormigón” pero permite al menos en ciertos “casos especiales”, la adición de agua o aditivos (si se realiza bajo responsabilidad del fabricante) para restaurar la consistencia de la mezcla a los valores especificados. Esto sólo cuando no se supera el valor límite de la relación agua/cemento de la especificación, y la adición de aditivos se incluye en el diseño de la mezcla de hormigón. El enfoque de EN 206-1 es perfectamente válido, pero tales “casos especiales” son frecuentes de manera que se debe prever un enfoque diferente.

En algunos lugares, para cumplir el objetivo de evitar un reamasado incontrolado del hormigón, se utiliza una técnica para realizar la dosificación de hormigón con más sequedad que el hormigón normal de referencia y añadir en la obra el agua de retención (normalmente entre el 5 y el 10% del agua total de diseño de la mezcla), si es necesario. Este procedimiento se especifica en las prácticas recomendadas del ACI en Hot Weather Concreting. [ACI Committee 305, 1991] Este procedimiento ha sido experimentado por algunos autores [Anderson y Carrasquillo, 1993], donde indican que después de transcurridos los primeros 60 minutos de transporte o de agitación prolongada, cualquier reamasado del hormigón fresco produce un asentamiento significativamente menor que el obtenido cuando se añade al principio toda el agua.

Otra opción es diseñar un hormigón con un valor de asentamiento inicial superior al especificado, de manera que cuando el hormigón fresco llegue a la obra, tenga el asentamiento especificado. Esta opción es a la vez ineficaz y cara, ya que se ha demostrado (al menos en climas cálidos) que un hormigón fresco con un asentamiento inicial superior tiene una tasa más alta de pérdida de trabajabilidad durante el transporte o durante la agitación.

2.4.9 Factores humanos

Factores sociológicos

Las condiciones meteorológicas afectan de forma directa al trabajador de la obra. El tiempo caluroso repercute tanto en la eficiencia laboral como también en factores más sociológicos asociados al periodo vacacional, cuando puede ocurrir que no se tomen todas las precauciones que serían oportunas para planificar y ejecutar la construcción con hormigón.

Las posibles causas de tipo sociológico son difíciles de valorar y de cuantificar. No obstante, es evidente la relación entre el descenso del rendimiento de los trabajadores y la llegada del verano. Los motivos de este menor rendimiento son diversos. Por un lado, las condiciones de trabajo son más duras y parece lógico pensar que los errores serán más frecuentes. Por otro lado, el verano suele ser la época del año elegida para el descanso vacacional, lo que puede llegar a ser más relevante de lo que podría parecer. [Comella et al., 2002]

Adición de agua

Desde un punto de vista de diseño, la trabajabilidad es casi siempre especificada por medio del asentamiento, medido por el cono de Abrams. Esta condición de aceptación del hormigón en estado fresco ocasiona muchas veces que el personal encargado de la manipulación del hormigón sea tentado a adicionar más agua de la requerida para una resistencia y consistencia dada, asumiendo que este exceso será compensado con la posterior evaporación del agua debido a las condiciones ambientales.

Es muy importante controlar la cantidad de agua de amasado empelada en la fabricación del hormigón, con el fin de evitar que la relación agua/cemento aumente por encima de los valores límites establecidos por razones de resistencia y durabilidad.

Es recomendable establecer un sistema de control específico en obra para evitar la adición incontrolada de agua al hormigón para conseguir aumentar su trabajabilidad. Pero no debe simplemente prohibirse esta práctica, sino aportar soluciones alternativas al problema de pérdida de trabajabilidad del hormigón. Para ello, durante los ensayos previos, es recomendable llevar a cabo un análisis de sensibilidad que permita ajustar la cantidad adicional de aditivo superplastificante a incorporar en la obra, sin que ello suponga una alteración significativa en las propiedades del hormigón. [Vaquero, 2003]

Probetas de control

Otra situación recurrente es que bajo condiciones de verano, los requerimientos estándar de curado y transporte de las probetas de control no sean estrictamente respetados, por ejemplo, la temperatura y humedad relativa de curado. Esta situación tiene como consecuencia que la resistencia se vea reducida y por lo tanto, haya problemas de calidad. [Cañadas, 1989], [Mouret et al., 2003], [Goeb, 1986], [Malisch, 1990]

Un estudio llevado a cabo por la NRMCA (National Ready Mixed Concrete Association) de EEUU sobre la baja resistencia de las probetas testigo durante la construcción en climas cálidos y basado en el supuesto por todos conocido, de que la resistencia del hormigón para una misma proporción es menor en verano que en otras estaciones del año, también consideró otros factores o variables como el inadecuado manejo de los moldes de las probetas en la obra. [Goeb, 1986]

Dentro de los resultados más significativos, se encuentra que la temperatura de curado en la obra tiene grandes repercusiones sobre la resistencia de las probetas de hormigón. En muchas obras, los moldes que contienen a las probetas de hormigón se encuentran directamente bajo los rayos del sol, lo cual hace que en ocasiones la superficie del hormigón ahí contenido llegue a alcanzar los 38 o 40 °C, aunado al propio calor generado por el hormigón debido a las reacciones exotérmicas. Por otro lado, ¿qué pasa cuando las probetas son moldeadas un viernes o un día antes de festivo?, éstas serán expuestas a la radiación solar por 2 o 3 días antes de que sean acarreadas al laboratorio para ser curadas, lo que tendrá consecuencias sobre los resultados de resistencia.

Todos somos conscientes de que el hormigonado en verano tiene consecuencias negativas sobre la resistencia del hormigón a 28 días. Este trabajo proporciona evidencias convincentes de que la mayor parte de estas pérdidas de resistencia no se deben a la mezcla de hormigón en sí, sino al indebido curado en obra de las probetas que supuestamente reflejan la resistencia del hormigón.

2.5 MECANISMOS DEL HORMIGÓN INFLUENCIADOS POR LA TEMPERATURA

En términos estrictamente químicos, la hidratación es la reacción de un compuesto anhidro con el agua, y que produce un nuevo compuesto llamado hidrato. En la química del cemento, la hidratación es entendida como una reacción de un cemento no hidratado o alguno de sus constituyentes (compuestos) con el agua, asociado con los cambios tanto químicos como físicos del sistema, en particular con el fraguado y el endurecimiento posterior.

Una hidratación parcial del cemento puede tener lugar incluso con la humedad del aire, sin embargo, para tener una hidratación completa del cemento, éste debe ser mezclado con suficientes cantidades de agua. La relación agua/cemento afecta a la reología de la suspensión, al progreso de la hidratación y a las propiedades del material hidratado. Para relaciones agua/cemento entre 0,3 y 0,6, la suspensión tiene cierta consistencia y es llamada “pasta de cemento fresco”. El término “fraguado” implica una pérdida repentina de plasticidad de la pasta original y su conversión a un material sólido con una resistencia apenas medible. El término “endurecimiento” implica el desarrollo de la resistencia y se presenta poco tiempo después del fraguado.

Debido a que el cemento Portland es un sistema de múltiples componentes, el proceso de hidratación es muy complejo; éste proceso consiste en reacciones químicas individuales que se presentan paralelamente y sucesivamente en el tiempo. El proceso de hidratación y su cinética están influenciados por una gran variedad de factores, especialmente:

- por la composición de cada fase del cemento y la presencia de iones externos con reticulación cristalina de cada una de las fases individuales del clinker;
- por la finura del cemento, en particular por la distribución del tamaño de partículas y la superficie específica;
- por la relación agua/cemento;
- por la temperatura de curado; y
- por la presencia de aditivos químicos y adiciones minerales.

2.5.1 Propiedades térmicas del hormigón.

Algunos factores térmicos como el calor específico y el incremento de calor adiabático son datos necesarios para conocer las propiedades térmicas del hormigón. Existe un gran número de publicaciones referentes a las propiedades térmicas del hormigón maduro. Sin embargo, en lo relativo a valores de las propiedades térmicas del hormigón a edades tempranas, cabe señalar que las referencias bibliográficas no son

numerosas, destacando entre éstas la referencia de [RILEM Commission 42-CEA, 1981]. Los principales factores que influyen en las propiedades térmicas del hormigón son la edad (grado de hidratación), cantidad y tipo de árido, temperatura, y contenido de agua, si bien que el [ACI Committee 207.1R-96] destaca que el principal factor que afecta a las propiedades térmicas del hormigón es la composición mineralógica de los áridos. A continuación se lleva a cabo una revisión de las propiedades térmicas del hormigón que regulan la evolución de la temperatura durante el proceso de fraguado y endurecimiento.

Calor específico

El calor específico ‘c’ de un material se define como la cantidad de calor necesaria para elevar en una unidad de temperatura una unidad de masa del material. El calor específico del hormigón depende del tipo y cantidad de sus constituyentes, principalmente los áridos, de la temperatura a la que está sometido durante su determinación experimental y del grado de saturación.

[Calmon, 1995] presenta algunos valores de calor específico del hormigón a la edad de 6 a 7 horas obtenidos de ciertas referencias y determinados en base a ensayos experimentales. Los ensayos se realizaron utilizando hormigón convencional con un contenido de cemento de 300 kg/m³ y relación agua/cemento de 0,65. Los resultados indican que el calor específico disminuye casi linealmente con el tiempo, de 1,15 a 0,89 kJ/kg·°C (23%). Se observó que la disminución en el contenido de humedad puede reducir el calor específico y que el valor de tal propiedad disminuye substancialmente durante el período inicial de hidratación.

Por otra parte, la influencia del grado de saturación en el calor específico del hormigón es en aumento con la absorción y con su grado de saturación, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$c = \frac{c_{\text{sss}} + \gamma(y-1)}{1 + \gamma(y-1)}; \text{ donde}$$

c = calor específico del hormigón

c_{sss} = calor específico del hormigón saturado con superficie seca

γ = contenido de humedad del hormigón saturado con superficie seca

y = contenido de humedad del hormigón expresado como una fracción del valor de absorción.

Otros factores como el tamaño máximo de áridos, la relación agua/cemento, el contenido de aire ocluido y la temperatura de ensayo fueron estudiados, encontrándose que influencia más significativa es la correspondiente a la temperatura de ensayo, ya que al aumentar provoca un crecimiento sistemático del calor específico. La influencia de otros factores, dentro de los límites normales de dosificaciones de hormigón, es prácticamente nula.

Incremento adiabático de la temperatura

Se considera que un cuerpo se encuentra en condiciones adiabáticas cuando no hay intercambio de energía calorífica entre éste y el entorno que le rodea. La hidratación del cemento, al ser una reacción química exotérmica, provoca liberación de calor. El incremento adiabático viene determinado por la diferencia existente entre la temperatura máxima alcanzada por la masa del hormigón y la temperatura del hormigón fresco. Dicho incremento es provocado únicamente por el calor generado durante el proceso de hidratación, sin que exista ningún intercambio calorífico con el exterior. El incremento adiabático de la temperatura del hormigón puede determinarse a través de la siguiente relación:

$$\Delta T = \frac{C \cdot H}{c \cdot \rho} ; \text{ donde}$$

ΔT = incremento adiabático de la temperatura

C = consumo de cemento o conglomerante

H = calor de hidratación del cemento o conglomerante

c = calor específico del hormigón

ρ = peso específico del hormigón

Con base a la relación anterior se verifica que el incremento de calor adiabático de temperatura del hormigón es directamente proporcional al consumo y calor de hidratación del cemento o conglomerante utilizado e inversamente proporcional a la capacidad calorífica del hormigón. Estudios llevados a cabo sobre los diferentes factores que pueden influir en el incremento de temperatura, indican que el tipo de cemento o conglomerante y su dosificación son los factores más decisivos.

Los compuestos principales del cemento (C_3S , C_2S , C_4AF y C_3A) liberan cantidades diferentes de calor durante las reacciones de hidratación. Por lo tanto la cantidad de calor liberada, responsable de la elevación adiabática de temperatura, está directamente relacionada con la composición química del cemento utilizado.

La finura de molido influye solamente en la velocidad del desarrollo de las reacciones de fraguado, pero no interviene en el valor final de la cantidad total de calor generado. Por ello, curvas de elevación adiabática de temperatura pueden presentar desarrollos iniciales diferenciados en función de la finura de molido.

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

Asimismo, la utilización de materiales puzolánicos influye de manera decisiva en el desarrollo de la curva de incremento de calor adiabático y en el valor final del

mismo. La sustitución de parte del cemento por materiales puzolánicos provoca un descenso acentuado en la velocidad de subida de la temperatura del hormigón y en el valor final de la misma.

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

2.5.2 Hidratación

La hidratación del cemento Portland puede explicarse como una secuencia de reacciones químicas entre los componentes del clínker, el yeso y el agua que conducen al fraguado y endurecimiento de la pasta de cemento. El proceso de fraguado es la consecuencia del cambio de un sistema de "copos" (flocs) hacia un sistema de esqueleto viscoelástico capaz de resistir tensiones, al menos durante un período corto, sin sufrir deformaciones significativas. La reducción de la porosidad y la formación de un material complejo elástico primero y frágil después es llamada fraguado. El fraguado es un proceso físico-químico que desarrolla las propiedades mecánicas últimas del material. [Jawed et al., 1983] Los compuestos que participan en las reacciones químicas de hidratación del cemento son los siguientes: [Hewlett, 2001]

- alita (silicato tricálcico);
- belita (silicato dicálcico);
- aluminato tricálcico;
- celita (ferroaluminato tetracálcico);
- cal libre (óxido de calcio);
- sulfatos alcalinos;
- sulfato cálcico en la forma de dihidrato, hemihidrato o anhidrato; y
- agua de amasado.

El progreso de este proceso depende de:

- la velocidad de disolución de las fases involucradas;
- la velocidad de nucleación y formación de los cristales de los productos de hidratación; y

- la velocidad de difusión del agua y de los iones disueltos a través del material hidratado una vez que fue formado.

Al comienzo de la hidratación, el proceso tiende a ser controlado principalmente por la velocidad de disolución de las fases del clinker y del sulfato cálcico. Conforme la hidratación progresa, la velocidad de reacción llega a ser controlada cada vez más por la velocidad de nucleación y formación de cristales de los productos de hidratación y, finalmente, por la velocidad de difusión del agua y iones disueltos en ella. Los siguientes factores determinan la cinética del proceso de hidratación:

- la composición del clinker y la calidad y cantidad de iones externos incorporados en la estructura física de los minerales individuales del clinker;
- el historial del procesamiento del clinker, incluyendo la velocidad de calentamiento, temperatura máxima de cocción y velocidad de enfriamiento;
- la cantidad y forma de sulfatos cálcicos presentes en el cemento;
- la finura del cemento;
- la relación agua/cemento de la mezcla;
- las condiciones de curado;
- la temperatura de hidratación; y
- la presencia o no de aditivos químicos.

2.5.3 Sentido físico de los mecanismos de hidratación, fraguado y endurecimiento del cemento en el hormigón

Es bien sabido que las reacciones químicas entre el cemento y el agua transforman las pastas de cemento, morteros y hormigón de fluidos a cuerpos rígidos. Los materiales permanecen trabajables dentro del período de inducción debido a que la posterior hidratación es retrasada por los productos de hidratación que se forman alrededor de los granos de cemento. Cuando estos revestimientos son fracturados por la presión osmótica, la hidratación continúa y el proceso de fraguado toma lugar.

El término fraguado ha sido utilizado para describir la incipiente rigidez en la pasta de cemento en estado fresco y en el hormigón fresco. El fenómeno del fraguado puede ser alterado por varios factores, tales como la relación agua/cemento, temperatura de curado y aditivos. El hormigón, el mortero o la pasta de cemento, que tengan un alto contenido de agua o que sean curados a bajas temperaturas, tienden a fraguar más lentamente.

Los efectos de los aditivos en el fraguado varían significativamente debido a variaciones en su composición química. Termodinámicamente, el fraguado inicial es marcado por un rápido incremento de temperatura, el cual corresponde aproximadamente con el inicio de las principales reacciones químicas. Este incremento térmico alcanzará un valor máximo cerca del fraguado final. No obstante, las relaciones entre las manifestaciones químicas y físicas son inciertas debido a la carencia de información acerca del desarrollo de dureza durante el proceso de hidratación. [Sohn y Johnson, 2002]

Se sugiere que el proceso de hidratación de cemento es la nucleación y crecimiento difusional que se puede explicar por teorías de transformación de fase. Visto de esta manera, los primeros núcleos de cemento hidratado se forman en los puntos más favorables desde el punto de vista energético de las superficies presentes en el sistema. Los áridos, las adiciones y la superficie de los encofrados suministran los puntos necesarios para la formación de núcleos. Los núcleos crecen, bajo un proceso de difusión controlado, hasta que se produce el solapamiento de los centros en crecimiento o el agotamiento de los centros de difusión.

Se ha sugerido que el tiempo necesario para la formación de una cantidad apreciable de núcleos es el período de inducción. El tiempo de fraguado inicial se puede considerar como equivalente a este período de inducción, que se corresponden físicamente a cierta pérdida de fluidez cuando se ha formado un número apreciable de núcleos de la nueva fase. El tiempo de fraguado final se puede considerar como aquel tiempo correspondiente al tiempo en que se produce la formación de puentes entre los centros en crecimiento. Lo que se denomina endurecimiento del hormigón sería un crecimiento continuo de la nueva fase, es decir, el cemento hidratado, que se interbloquea gradualmente y crea una matriz donde los inertes están rodeados y ligados entre sí.

El sentido físico de las reacciones durante la hidratación del cemento se muestra en la **Tabla 2.1**. Las reacciones de hidratación continúan hasta que los reactantes inadecuados (componentes del cemento y agua) y el espacio para alojar los productos de hidratación hagan que dichas reacciones cesen. [Jawed et al., 1983]

Etapa de reacción	Proceso químico	Proceso físico	Propiedades mecánicas
Primeros minutos	Rápida disolución inicial de sulfatos alcalinos y aluminatos; hidratación inicial del C ₃ S; formación del AFt	Alta velocidad de liberación de calor	Cambios en la composición de la fase líquida que pueden influir en el posterior fraguado
Primeras horas (período de inducción)	Reducción de silicatos y concentración de iones Ca ²⁺ ; formación de CH y C-S-H; la concentración de Ca ²⁺ alcanza el nivel de sobresaturación	Formación de productos de hidratación iniciales; baja liberación de calor; incremento continuo de viscosidad	Formación de las fases AFt y AFm que pueden influir en el fraguado y la trabajabilidad; la hidratación de los silicatos cálcicos determina el fraguado inicial y el fin del período de inducción
Aproximadamente 3 a 12 horas (etapa de aceleración)	Reacción química rápida del C ₃ S y aceleración de la formación de C-S-H y CH; disminución de la concentración de Ca ²⁺	La rápida formación de hidratos conduce hacia la solidificación y la disminución de la porosidad; alta velocidad de liberación de calor	Paso de consistencia plástica a rígida (fraguado inicial y final); desarrollo de la resistencia inicial
Etapa de post-aceleración	Difusión-formación controlada de C-S-H y CH; recristalización de la etringita hacia monosulfato y alguna polimerización de posibles silicatos; la hidratación del C ₂ S llega a ser significativa	Importante disminución de la velocidad de liberación de calor; descenso continuo de la porosidad; formación de adherencia partícula-partícula y pasta-árido	Desarrollo continuo de resistencia; disminución de fluencia; la porosidad y morfología del sistema hidratado determinan la resistencia última, estabilidad de volumen y durabilidad

Notas: C-S-H: silicato cálcico hidratado o gel de tobermorita; CH: hidróxido de calcio
 Afm: es la fase formada en la hidratación del cemento Portland que se deriva del monosulfoaluminato puro con sustitución parcial de A (Al₂O₃) por F (Fe₂O₃) y SO₄⁻² por otros aniones.
 AFt: es la fase formada en la hidratación del cemento Portland que se deriva de la etringita pura con sustitución parcial de A (Al₂O₃) por F (Fe₂O₃) y SO₄⁻² por otros aniones.

Tabla 2.1: Relación entre las etapas de reacción de hidratación del cemento Portland con los procesos químicos, físicos y propiedades mecánicas [Jawed et al., 1983]

2.5.4 Mecanismo de hidratación

La hidratación del cemento Portland a temperatura ambiente es caracterizada por varias etapas o períodos, los cuales se describen a continuación. Químicamente, la hidratación es un proceso complejo de disolución-precipitación, en el cual, las diferentes reacciones de hidratación se llevan a cabo a diferentes velocidades e influencia cada una. La disolución de las fases anhidras hace posible la formación de compuestos cuyas solubilidades son menores de las que forman los minerales anhidros del clinker, de esta forma, conducen a la precipitación de hidratos coloidales y cristalinos que estructuran la pasta de cemento endurecida.

Una manera de explicar las reacciones químicas en el proceso de hidratación del cemento es analizando las curvas de evolución de calor de hidratación. En la **Figura 2.4** se muestra gráficamente la hidratación del cemento en función de la cantidad de liberación de calor. [Jawed et al., 1983]

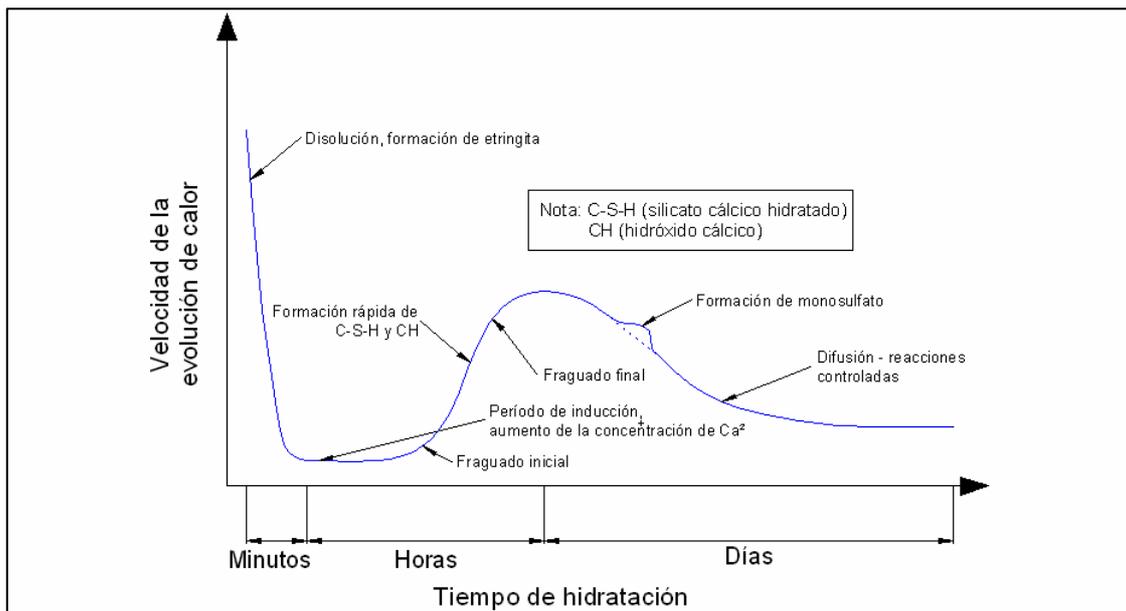


Figura 2.4.- Representación esquemática de la hidratación del cemento

Período de inducción (primeros minutos y horas)

Inmediatamente después del contacto del cemento con el agua, un intercambio de iones se lleva a cabo entre las fases sólida y líquida. La alta solubilidad de algunos compuestos del clinker conduce a un rápido aumento en la concentración de la fase líquida con respecto a los aluminatos de calcio, sulfatos y álcalis. Una gran cantidad de calor es liberada mientras se forman los primeros productos de hidratación, los cuales son bastante difíciles de caracterizar morfológicamente. Posteriormente, la velocidad de evolución de calor disminuye muy rápidamente, sin embargo, durante el período de inducción, la concentración de Ca^{2+} de la fase líquida alcanza la sobresaturación con

respecto al CH y, consecuentemente, la nucleación y el crecimiento del C-S-H y el CH comienzan. Esta sobresaturación es comúnmente alcanzada en la etapa inicial del período de inducción, el tiempo exacto depende de las condiciones de la reacción y del ambiente químico. [Hewlett, 2001], [Jawed, 1983]

Período de aceleración (3 a 12 horas después del mezclado)

En este período, el progreso de la hidratación se acelera nuevamente y es controlado por la nucleación y por el crecimiento de nuevos productos de hidratación resultantes. La velocidad de hidratación del C_3S se acelera y la segunda etapa de formación de C-S-H comienza. Una notable hidratación del C_2S tiene lugar también. El hidróxido cristalino cálcico (portlandita) se precipita de la fase líquida y junto con éste, la concentración de Ca^{2+} en la fase líquida disminuye gradualmente. El sulfato cálcico, en conjunto con el cemento es completamente disuelto y la concentración de SO_4^{2-} en la fase líquida comienza a disminuir debido a la formación de la fase AFt y a la adsorción de SO_4^{2-} en la superficie del C-S-H formado. [Hewlett, 2001]

Período de post-aceleración

En este período, la velocidad de hidratación disminuye gradualmente conforme la cantidad de material que todavía no ha reaccionado disminuye y, la velocidad de hidratación llega a ser controlada por la difusión. La fase del C-S-H continúa formándose debido a la hidratación continua del C_3S y del C_2S . La contribución del C_2S en este proceso se incrementa con el tiempo y, consecuentemente, la velocidad con la cual el hidróxido de calcio adicional es formado se reduce. Después de que el abastecimiento de sulfato cálcico ha sido agotado, la concentración de SO_4^{2-} en la fase líquida disminuye. Como consecuencia de esto, la fase AFt que ha sido formada en las etapas de hidratación iniciales, comienza a reaccionar a través de una solución con el C_3A adicional y con el $C_2(A,F)$, asimismo, también hace reacción con el monosulfato producido. [Hewlett, 2001]

2.5.5 Cinética del proceso de hidratación

Aunque la mayoría de los cementos reaccionan con agua dentro de los primeros días, las velocidades a las cuales cada compuesto individual del clinker reacciona son diferentes; las reactividades en el cemento son aproximadamente en el siguiente orden: $C_3A > C_3S > F_{SS} > C_2S$. Debe ser recordado que las reactividades de dos cementos de igual química y composición mineralógica pueden diferir en su velocidad de reacción debido a que cada uno de los compuestos reaccionan de diferente forma en función de su historial de fabricación; principalmente en la velocidad de cocción y temperatura del clinker así como de el posterior enfriamiento. La composición del clinker y su reactividad también dependen de la mineralogía de los compuestos de la harina cruda. [Jawed et al., 1983]

La velocidad de hidratación de los minerales del clinker depende también del ambiente de hidratación. La composición de la fase líquida en las proximidades de las partículas de cemento es crítica y tiene una gran influencia en la velocidad a la cual los componentes del clinker se disuelven. La composición de la fase líquida, depende de la solubilidad de los compuestos más reactivos o solubles y también el sistema es del tipo dinámico y constantemente varía en función del tiempo. Un ejemplo de esto es el incremento de la velocidad de reacción del C_2S en presencia del C_3S . Las diferencias en las velocidades de reacción de los minerales puros del clinker y aquellos de misma composición que están presentes en el cemento son ilustrados en la **Figura 2.5**. Las consideraciones antes mencionadas son aún más importantes en el caso donde la utilización de aditivos químicos se lleve a cabo para modificar el comportamiento de la hidratación.

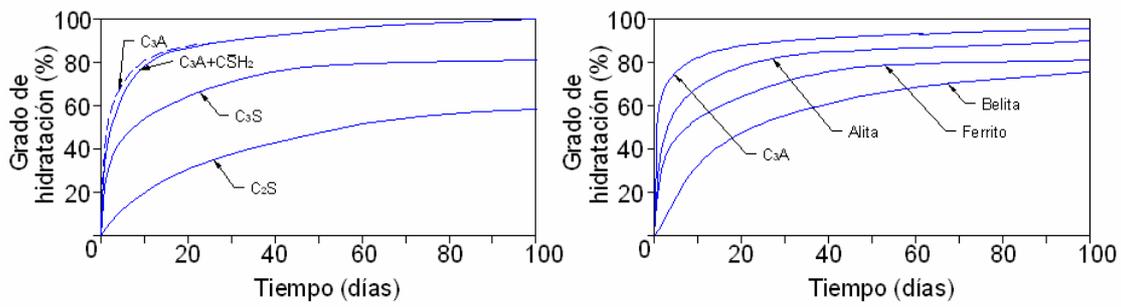
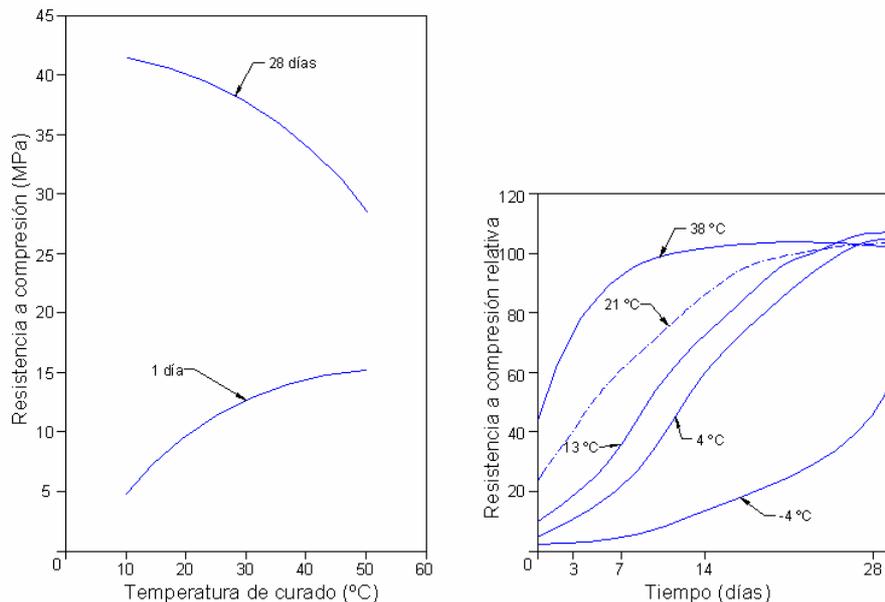


Figura 2.5.- velocidad de hidratación de los compuestos del cemento:
(a) en pastas de compuestos puros; (b) en pastas de cemento

La temperatura a la cual se lleva a cabo el proceso de hidratación es otro factor importante dentro de la cinética. Generalmente, una temperatura alta incrementa la velocidad de hidratación en edades tempranas, sin embargo, los grados de hidratación y desarrollo de resistencia a edades posteriores son frecuentemente reducidos. La temperatura tiene influencia sobre la cinética de hidratación debido a que provoca cambios en la solubilidad de los componentes del cemento y éste efecto provoca cambios en la composición y morfología de los productos de hidratación. El efecto de la temperatura en la velocidad de desarrollo de resistencia es mostrado en la **Figura 2.6**. La temperatura real de hidratación depende del calor de hidratación del cemento y de la liberación de calor. Por lo tanto, la temperatura interna del hormigón deberá ser mayor que la temperatura ambiente si son mantenidas las condiciones cuasi-adiabáticas.



*Figura 2.6.- Efecto de la temperatura en el desarrollo de la resistencia a compresión:
 (a) comparación de la resistencia a 1 día y a 28 días (temperatura de curado constante);
 (b) resistencias a diferentes temperaturas de curado constantes*

En hormigones masivos, las condiciones adiabáticas reales pueden ser logradas cuando los volúmenes de hormigón son muy grandes en comparación con la superficie que pueda transferir calor a los elementos de alrededor. La generación de altas temperaturas internas en la masa del hormigón tiene lugar principalmente en los primeros días, cuando el hormigón es relativamente plástico y no causa daños inmediatos. No obstante, los problemas pueden hacerse presentes durante el posterior enfriamiento cuando el hormigón ha desarrollado rigidez ya que las tensiones térmicas pueden provocar fisuración. Una forma en la que se puede controlar el incremento excesivo de temperatura de hidratación es disminuyendo el contenido de C_3S y C_3A debido a que estos compuestos tienen los calores de hidratación mayores y también las velocidades más altas de evolución de calor.

2.5.6 Calor de hidratación

La hidratación del cemento Portland está asociada a la liberación de calor de hidratación (ver [Figura 2.4](#)). La hidratación del cemento incluye varias reacciones exotérmicas; este hecho tiene suma importancia desde el punto de vista de que la hidratación del cemento tiene un carácter auto-catalítico. El calor desarrollado en los primeros momentos de la hidratación (correspondiente a las reacciones del C_3A y sulfatos cálcicos y alcalinos) tiene influencia sobre la velocidad de disolución de las especies iónicas necesarias en la fase líquida para iniciar la aceleración de la hidratación de la alita. Una vez que la hidratación de la alita tiene lugar, el calor desarrollado acelera las reacciones de la alita aún sin reaccionar (y posiblemente también las de la

belita) hasta que la disminución de los espacios y los cambios en la composición de la fase líquida aminoren la velocidad de las reacciones posteriores.

El calor de hidratación de los componentes principales del clinker se muestran en la **Tabla 2.2**.

Fase inicial		Producto de la reacción	Calor de hidratación	
			kJ / kg	kJ / mol
C ₃ S	(+H)	C-S-H + CH	520	118
C ₂ S	(+H)	C-S-H + CH	260	45
C ₃ A	(+CH+H)	C ₄ AH ₁₉	1160	314
C ₃ A	(+H)	C ₃ AH ₆	910	245
C ₃ A	(CSH ₂ +H)	C ₄ ASH ₁₂ (AFm)	1140	309
C ₃ A	(CSH ₂ +H)	C ₆ AS ₃ H ₃₂ (AFt)	1670	452
C ₄ AF	(+CH+H)	C ₃ (A,F)H ₆	420	203

Tabla 2.2.- Calores de hidratación de los componentes principales del cemento [Jawed et al., 1983]

2.5.7 Fraguado

El “fraguado” es el proceso en el cual una pasta de cemento en fresco que fluye libremente o de consistencia plástica es convertida en un nuevo material que ha perdido su deformabilidad ilimitada y puede desmenuzarse bajo el efecto de una fuerza externa suficientemente grande. El fraguado es seguido por el “endurecimiento” de la pasta en el cual la dureza, resistencia y módulo de elasticidad se incrementan hasta que un valor último de estos parámetros es alcanzado. El endurecimiento es precedido a su vez por el cambio de consistencia totalmente plástica a una consistencia más viscosa pero sin perder su carácter plástico.

Después de mezclar el cemento Portland con una cantidad suficiente de agua (relaciones agua/cemento ~ 0,3 a 0,7) inicialmente los granos de cemento son uniformemente distribuidos en la fase líquida. Cuando una pasta de cemento fresca es producida, sus propiedades reológicas (consistencia) dependen de la relación agua/cemento, la finura del cemento y su composición. Después de algunos minutos de mezclado, tiene lugar la floculación de las partículas de cemento, asociadas con un incremento en la viscosidad de la pasta. Pequeños grumos de partículas de cemento son formados, los cuales atrapan una cierta cantidad del agua de mezclado haciendo que esta no pueda participar en el flujo de la pasta. Esta floculación inicial de las partículas de cemento es producida por los potenciales zeta opuestos y por las diminutas fuerzas de “van der Waals”.

Antes del fraguado, es decir, durante el período inactivo y al comienzo de la etapa de aceleración, la floculación de la pasta puede ser reversible. Un remezclado o la aplicación de ultrasonido puede destruir los primeros enlaces que podrán ser reconstruidos otra vez posteriormente. Adicionalmente a la floculación, la viscosidad aparente de la pasta también aumenta debido a la hidratación progresiva del cemento, lo que a su vez resulta en un aumento gradual de la relación sólido / líquido existente así como la formación de una textura rugosa en la superficie de las partículas de cemento causada por la precipitación de los hidratos ya formados.

En el período de aceleración de la hidratación, la cantidad de los productos de hidratación aumenta rápidamente y al mismo tiempo, el volumen de la fase líquida disminuye. Los enlaces químicos se desarrollan en los puntos de contacto entre las partículas de cemento cubiertas por los productos de hidratación. Estos últimos enlaces son más resistentes que los de van der Waals y las fuerzas electrostáticas que son las responsables de la floculación, ya no pueden ser restauradas si llegan a fracturarse. Conforme la cantidad de productos de hidratación crece, el número de contactos entre partículas también aumenta y al mismo tiempo, una cadena tridimensional de sólidos se desarrolla dentro de la pasta. Poco tiempo después del fraguado el número de contactos entre las partículas es aún bajo y de esta manera la cadena de sólidos puede ser fracturada fácilmente por fuerzas externas, es decir, la resistencia de la pasta es todavía baja. Sin embargo, conforme la hidratación progresa y la cantidad de productos de hidratación aumente a expensas de los espacios de los poros llenos de agua, los enlaces entre las partículas sólidas se refuerzan resultando en un incremento gradual de la resistencia de la pasta.

El fraguado normal de un cemento Portland parece ser consecuencia de la hidratación del C_3S y del C_3A y de la formación de las fases C-S-H y AFt. De acuerdo a otras hipótesis, el fraguado del cemento Portland se debe a una re-cristalización de la etringita microcristalina primaria en cristales altamente desarrollados.

2.5.8 Efecto de la temperatura en el proceso de hidratación

Efecto en la velocidad de hidratación

La velocidad de las reacciones químicas en general, es incrementada con la temperatura. Este efecto acelerador de la temperatura obedece a la siguiente ecuación empírica, conocida con la ley de Arrhenius:

$$\frac{d(\ln k)}{dT} = \frac{A}{RT^2}; \text{ donde}$$

- k = velocidad de reacción específica
- T = temperatura absoluta
- A = constante de energía de activación
- R = constante de gas = 8,314 J/mol·°C

A temperaturas superiores a 20 °, la energía de activación del cemento Portland puede considerarse igual a 33500 J/mol. En base a la ecuación anterior, si la temperatura se incrementa de 20 a 30, 40 y 50 °C, la velocidad de hidratación será incrementada 1,57, 2,41 y 3,59 veces, respectivamente.

Este efecto acelerador de la temperatura sobre las reacciones del cemento en el hormigón, tiene lugar todos los días en la producción real y está sustentado por suficiente información experimental.

Efecto en la estructura de la pasta de cemento

La temperatura, por medio de su efecto acelerador en la velocidad de hidratación, acelera la formación de la estructura sólida del cemento hidratado. Sin embargo, la temperatura también afecta la naturaleza de tal estructura, y en particular, la naturaleza del sistema poroso. Este efecto es de gran importancia ya que las propiedades mecánicas del hormigón, así como la durabilidad, tienen gran dependencia de las características físicas de la pasta de cemento.

La porosidad de la pasta de cemento, durante el proceso de hidratación, tiende a disminuir mientras este proceso avanza. Por lo tanto, como la velocidad de hidratación es acelerada por la temperatura, la correspondiente disminución de la porosidad es igualmente acelerada. Consecuentemente, a cierta edad, la porosidad de una pasta de cemento curada a bajas temperaturas será mayor que la porosidad de una pasta de características iguales, pero curada a una mayor temperatura.

Por otro lado, la temperatura también afecta la naturaleza de la distribución del tamaño de los poros en la pasta de cemento, en este caso, una temperatura mayor es asociada con un sistema más pobre. Este efecto es ilustrado en la *Figura 2.7*.

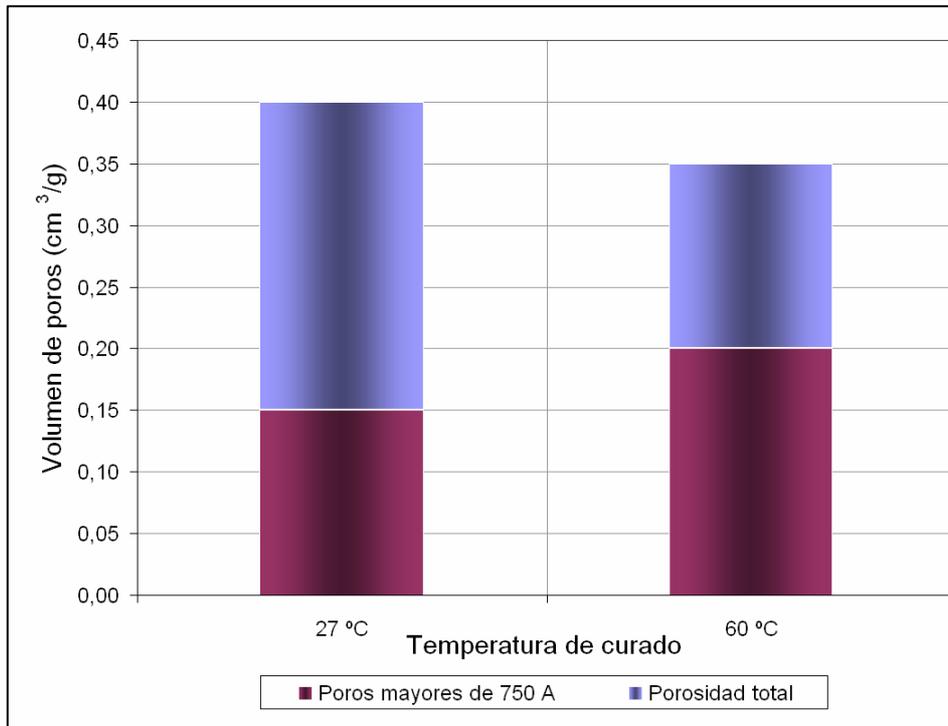


Figura 2.7.- Efecto de la temperatura en la porosidad total y en tamaño de los poros (Pasta con relación agua/cemento=0,40 a 28 días) [Soroka, 1993]

En la **Figura 2.7** puede verse que aunque la porosidad total es menor en la pasta curada a 60 °C, el volumen de poros con un radio mayor a 750 Å es mayor. Este es un factor de gran importancia, ya que la permeabilidad de la pasta de cemento es principalmente determinada por el volumen de los poros grandes, más que la porosidad total. Por otra parte, la naturaleza más gruesa del sistema poroso explica también, en parte, los efectos adversos de la temperatura en la resistencia del hormigón en edades posteriores.

2.5.9 Desarrollo de microestructura y endurecimiento

La microestructura de la pasta de cemento hidratada mantiene su desarrollo desde el primer contacto del cemento con el agua hasta el final de la hidratación. Los períodos típicos son llamados pre-inducción, inducción (o período inactivo), período de aceleración y período de post-aceleración. La **Figura 2.8** muestra el desarrollo de un grano de cemento. Es habitual distinguir entre el producto de hidratación exterior que crece en el espacio originalmente ocupado por agua y el producto de hidratación interior, que crece en el espacio del grano de cemento. El volumen total de la hidratación completa del cemento es mayor de 2,25 veces el volumen unitario del cemento no hidratado. [Reinhardt, 1998]

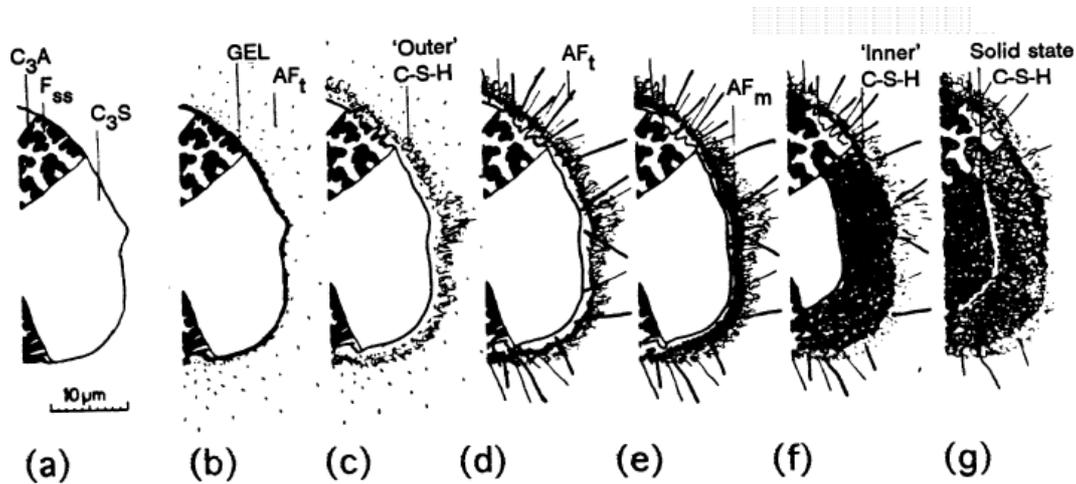


Figura 2.8.- Desarrollo microestructural de un grano de cemento

A continuación, se presenta un resumen del desarrollo microestructural de un grano de cemento basado en la [Figura 2.8](#).

- (a) Sección no hidratada de un grano polimineralizado (la escala de la fase intersticial ha sido ligeramente exagerada).
- (b) 10 minutos. Una parte del C_3A ha reaccionado con el sulfato de calcio en la solución. En la superficie se forma un gel amorfo rico en aluminato y barras cortas de AF_t rodean el núcleo en los bordes del gel en la solución.
- (c) 10 horas. Comienza a reaccionar el C_3S para formar productos de hidratación exteriores de C-S-H sobre la cadena de barras de AF_t dejando $1\ \mu m$ entre la superficie del grano y el cascarón hidratado.
- (d) 18 horas. Comienza la hidratación secundaria del C_3A produciendo largas barras de AF_t . Los productos de hidratación interiores del C-S-H comienzan a formarse dentro del cascarón debido a la hidratación continua del C_3S .
- (e) 1 a 3 días. El C_3A reacciona con el AF_t dentro del cascarón formando placas hexagonales de AF_m . La continuación de la formación de los productos de hidratación interiores reduce la separación entre el grano anhidro y el cascarón hidratado.
- (f) 14 días. Suficientes productos de hidratación interiores de C-S-H se han formado para llenar el espacio libre entre el grano y el cascarón. El C-S-H exterior se ha hecho más fibroso.

- (g) Años. El material anhidro restante reacciona lentamente mediante un mecanismo de estado sólido para formar productos de hidratación interiores de C-S-H adicionales. La fase ferrita permanece sin reaccionar.

Se ha observado que el producto de hidratación exterior tiene una relación C/S menor que el producto de hidratación interior a primeras edades, mientras que la relación C/S en la parte externa de una pasta madura es nivelada. La razón de esto es que las partículas más grandes reaccionan más lentamente (menor relación superficie / volumen) que las partículas menores y que los productos de hidratación exteriores. Estas causas referentes a los productos de hidratación interiores y exteriores solo pueden aplicarse claramente para un solo grano de cemento.

A manera de resumen se presenta en la **Figura 2.9** una representación esquemática y simplificada de los procesos de hidratación, fraguado y endurecimiento.

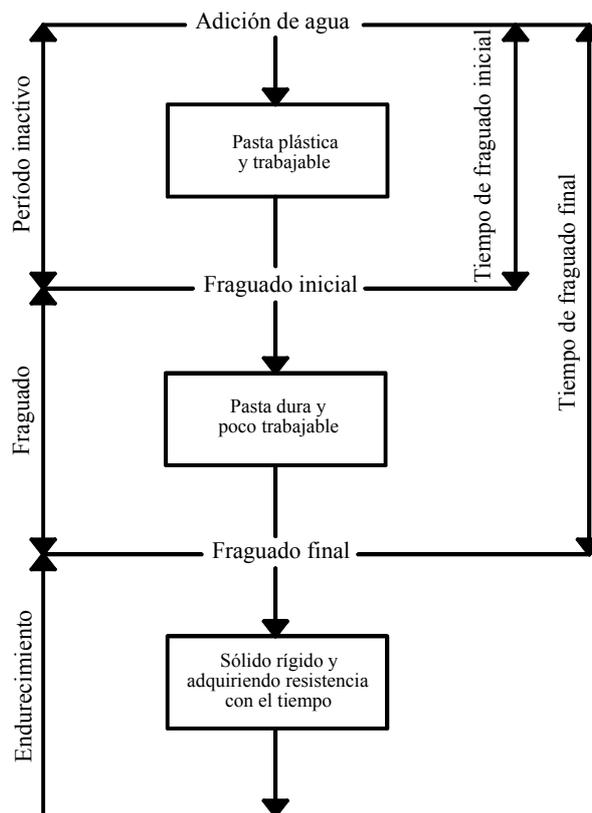


Figura 2.9.- Descripción esquemática de la hidratación, fraguado y endurecimiento de la pasta de Cemento Portland

De igual forma, se presenta en las **Figuras 2.10, 2.11 y 2.12** la descripción esquemática de la hidratación de un grano de cemento, la formación de la estructura en

una pasta de cemento hidratada y la esquematización de la estructura del gel de cemento, respectivamente.

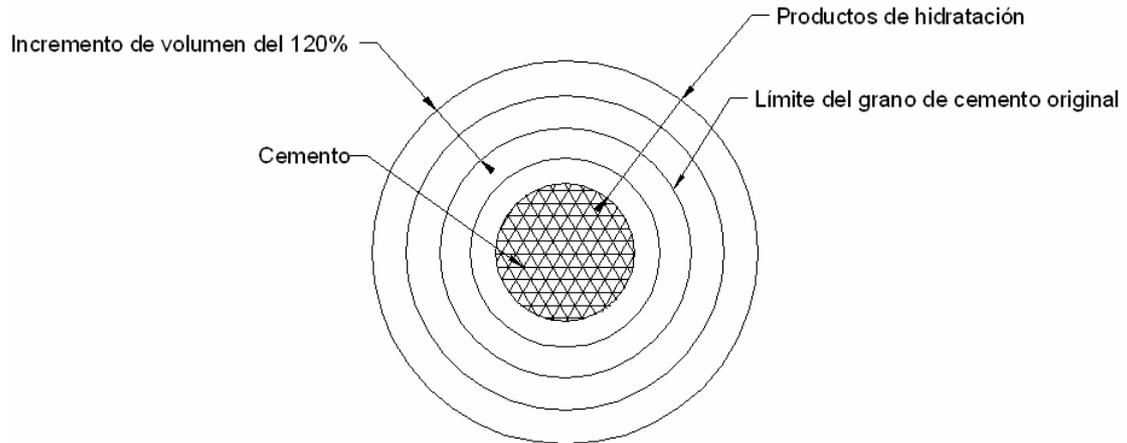


Figura 2.10.- Descripción esquemática de la hidratación de un grano de cemento

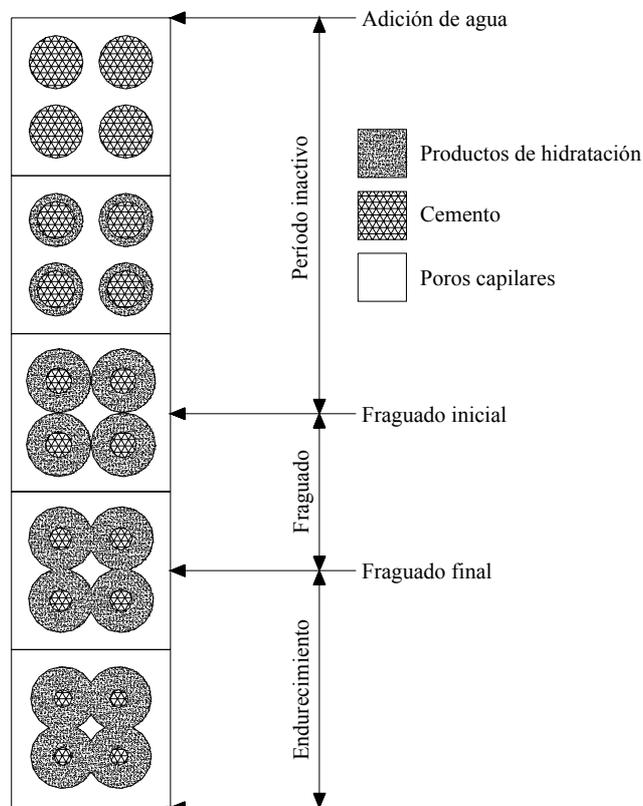


Figura2.11.- Descripción esquemática de la formación de la estructura en una pasta de cemento hidratada

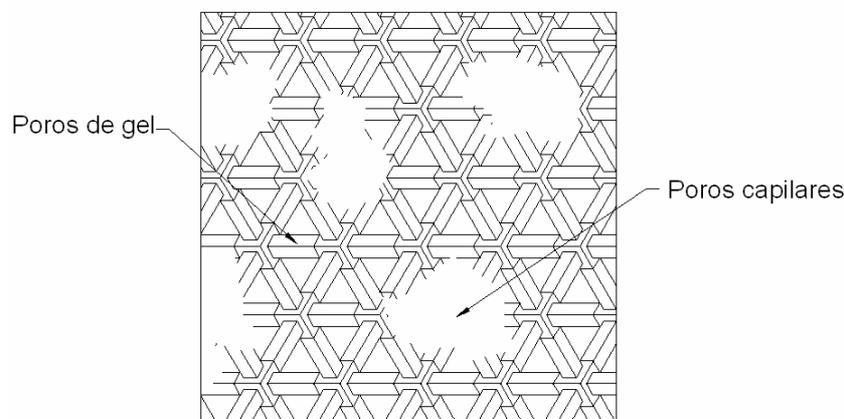


Figura 2.12.- Descripción esquemática de la estructura del gel de cemento

2.5.10 Morfología y microestructura (efecto de la temperatura)

El más antiguo y simple modelo del hormigón estaba basado en la suposición de que es un material compuesto de dos fases, con un árido grueso disperso en una matriz de mortero de cemento. Actualmente es conocido que la estructura de la pasta de cemento en las proximidades del árido grueso es diferente que la de la pasta de cemento pura. La fase en la cual el árido grueso afecta a las propiedades de la pasta de cemento es la llamada zona de transición de interfase (ITZ-interface transition zone). Estudios experimentales han mostrado que la ITZ tiene un efecto muy significativo en las propiedades mecánicas del hormigón. [Li et al., 1998]

El hormigón es un material con un rango múltiple de escalas. Desde una escala nanométrica hasta una milimétrica, el hormigón es diferente estructuralmente en cada escala. El hormigón no solo es diferente a cada escala de longitud, es también un material compuesto interactivo, donde las propiedades de cada fase afectan a las propiedades de las demás fases. [Bentz et al., 1998]

Algunos trabajos realizados sobre la caracterización experimental de la microestructura de materiales a base de cemento y curados a altas temperaturas, concluyen en la mayoría de las veces, que un incremento en la temperatura de exposición, además de ocasionar pérdidas de resistencia a compresión, produce una distribución no homogénea de los productos de hidratación en toda la matriz cementante.

Por ejemplo, [Mouret et al., 1999] hicieron un estudio como parte de un proyecto de investigación referente a las pérdidas de resistencia a 28 días de probetas de control de hormigones producidos en verano y en general en climas cálidos. En este estudio presentan las observaciones obtenidas sobre planos de fractura mediante técnicas de caracterización visual como SEM-Scanning Electron Microscopy y ESEM-Environmental Scanning Electron Microscope. El objetivo principal de este trabajo era

mostrar los efectos de una alta temperatura de exposición o de curado en la microestructura del hormigón.

Las conclusiones principales indican que, cuando la temperatura inicial o la temperatura de curado son incrementadas, la pasta en la matriz cementante presenta una textura morfológicamente más pobre. Los vacíos de aire y poros capilares también son más visibles, sobre todo cerca de la interfase pasta-árido. Además, en esta zona interfacial entre la pasta y el árido, se observó una microestructura más abierta, compuesta por barras de etringita y cristales masivos de hidróxido de calcio (CH). En resumen, parece ser que todas estas observaciones explican en cierta forma las disminuciones en resistencia en función de temperaturas elevadas, como resultado de un debilitamiento en la interfase pasta-árido.

2.5.11 Durabilidad

Los problemas potenciales para la durabilidad del hormigón endurecido que plantean las condiciones de tiempo cálido son también considerables. Incrementan la velocidad de endurecimiento a la vez que reducen la resistencia final que puede lograr el hormigón. Además, incrementan la tendencia a la retracción por secado y el agrietamiento térmico diferencial. Por lo tanto, la durabilidad del hormigón se ve afectada adversamente debido a:

- La mayor probabilidad de que el curado de la superficie de hormigón sea deficiente.
- La superior permeabilidad del hormigón debido a que los productos de hidratación del cemento son más gruesos.
- La presencia de grietas debidas a la retracción por secado y a los esfuerzos térmicos.

La durabilidad del hormigón es especialmente significativa como resultado de un potencial mayor de corrosión de los aceros de refuerzo, lo que reduce la vida útil de las estructuras. Finalmente, la variabilidad en cuanto a apariencia de la superficie es superior para el hormigón colocado y curado en condiciones de clima cálido.

Durabilidad del hormigón curado a vapor

Se ha probado experimentalmente que la resistencia y las propiedades del hormigón curado a vapor tienen variaciones significativas respecto a un hormigón curado a temperatura ambiente. En sus investigaciones [Ho et al., 2003], encontraron que los hormigones curados a vapor eran más porosos debido a unos mucho mayores valores de absorción comparada con los hormigones curados en condiciones estándar.

Ya que es generalmente aceptado que la permeabilidad de un hormigón a los líquidos o gases es un factor determinante en la durabilidad del mismo, en este caso el curado a vapor puede afectar esta propiedad. Asimismo, la resistencia mecánica podría verse disminuida debido a este aumento en la porosidad del hormigón.

También en este estudio se observó que los hormigones conteniendo humo de sílice tuvieron un mejor desempeño en general, debido a su rápido desarrollo de resistencia y los bajos valores obtenidos de absorción.

2.5.12 Desarrollo de resistencia

La temperatura tiene efectos sobre la resistencia del hormigón sobre (i) la velocidad de hidratación, (ii) la naturaleza de la estructura del hormigón y (iii) la velocidad de evaporación y el resultante secado del hormigón. Debe ser tomado en consideración que los efectos anteriores pueden ser contradictorios.

Por ejemplo, la temperatura acelera la hidratación y, en consecuencia, el desarrollo de la resistencia del hormigón. Por otro lado, una alta velocidad de evaporación debida al incremento de la temperatura, puede reducir la cantidad de agua libre y por consiguiente, retardar la velocidad de hidratación y, en ocasiones, llegar a cesarla por completo. Por lo tanto, en la práctica los efectos combinados de la temperatura en la resistencia varían y dependen de las condiciones específicas consideradas.

Se ha dicho antes que la velocidad de hidratación del cemento es considerablemente incrementada por el aumento de la temperatura. Como la resistencia del hormigón depende de la porosidad de la pasta de cemento, y la porosidad, a su vez está determinada por el grado de hidratación, es de esperar que la velocidad de desarrollo de resistencia y la resistencia del hormigón a edades tempranas sean incrementadas también con el aumento de la temperatura. Por otro lado, asumiendo que el efecto de la temperatura en el grado último de hidratación sea pequeño, y previniendo que el hormigón no sea secado, no se esperaría que la resistencia del hormigón a edades posteriores sea dependiente de la temperatura. Es decir, se supone que hormigones idénticos expuestos a diferentes temperaturas tendrían esencialmente la misma resistencia a edades posteriores. Sin embargo, ha sido demostrado históricamente que hormigones colocados y curados a temperaturas altas presentan la esperada alta resistencia inicial (hasta 7 días), pero su resistencia posterior se ve adversamente afectada (28 días o más). [Soroka, 1993]

A pesar de que generalmente es aceptado que la resistencia del hormigón a edades avanzadas es afectada por las altas temperaturas, algunas fuentes relevantes de la bibliografía difieren considerablemente.

[Soroka, 1993], recoge y resume algunos estudios experimentales sobre los efectos de las temperaturas de exposición y curado sobre la resistencia a compresión del hormigón, en ellos se observan los siguientes comportamientos:

- Algunos estudios muestran tendencias esperables, en el sentido de que la resistencia se reduce a medida que la temperatura aumenta, desde 5 hasta 46 °C.
- Otros investigadores, en el mismo rango térmico (5-46 °C) encontraron que la temperatura óptima, bajo la cual se alcanzaban las máximas resistencias, era de 13 °C.
- Sin embargo, algunos otros estudios determinan que la temperatura óptima, bajo la cual se obtienen las máximas resistencias, era de 30 o de 40 °C.

Estos resultados contradictorios reflejan la complicada naturaleza del efecto de la temperatura en el hormigón y, por otro lado, sustentan el hecho de que varios factores, en vez de solamente uno, toman parte en este proceso. Al parecer, estos factores tienen efectos diferentes en función de las condiciones experimentales, lo cual hace que las consecuencias finales sobre la resistencia, sean distintas también.

Algunos de estos factores, los cuales pueden explicar los efectos adversos de la temperatura elevada en la resistencia del hormigón, han sido tratados en este trabajo. En este sentido, se puede afirmar que estos efectos no son atribuibles a cambios en la composición de los productos de hidratación. Por otro lado, la temperatura afecta a la distribución de los tamaños de poros, asimismo crea un sistema poroso más grueso en el hormigón. Considerando las características de los materiales frágiles como el hormigón, es de esperarse que un sistema poroso más grueso genere resistencias mecánicas más bajas. Por lo tanto, los efectos adversos de la temperatura sobre la resistencia del hormigón pueden ser explicados, en parte, por la mayor porosidad ocasionada por esas temperaturas.

Se ha sugerido que los efectos adversos de la temperatura en la resistencia del hormigón son atribuibles a la heterogeneidad de la pasta de cemento formada a partir del proceso de hidratación llevado a cabo a altas temperaturas. A bajas temperaturas, cuando la hidratación es relativamente lenta, hay tiempo suficiente para que los productos de hidratación puedan diseminarse y precipitarse uniformemente entre los granos de cemento. Por el contrario, cuando el cemento se hidrata a temperaturas más altas, la velocidad de hidratación es acelerada y no permite que la precipitación de los productos de hidratación sea igual de uniforme; esto crea la tendencia de que los productos de hidratación se precipiten en las proximidades de los granos de cemento en proceso de hidratación. Consecuentemente, una altamente concentrada y densa pasta es formada alrededor de los granos de cemento en proceso de hidratación, mientras que una pasta más porosa y débil se forma con un mayor distanciamiento entre los granos. Esta pasta más débil determina la resistencia del cemento hidratado y por lo tanto, explica en parte la influencia de la temperatura en la resistencia.

El funcionamiento de este mecanismo explicado anteriormente es descrito esquemáticamente en la siguiente *Figura 2.13*. Esta figura muestra el efecto de la temperatura en la uniformidad de la estructura de la pasta. (A) muestra una pasta hidratada a temperaturas normales, con una densidad uniforme; (B) muestra una pasta de densidad no-uniforme hidratada a mayores temperaturas. [Soroka, 1993]

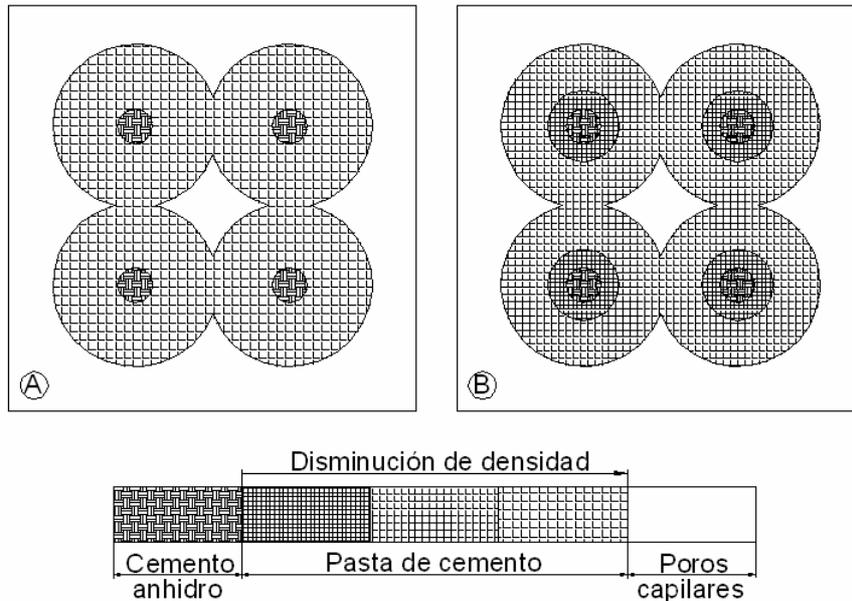


Figura 2.13.- Efecto de la temperatura en la uniformidad de la estructura de la pasta
[Soroka, 1993]

Por otro lado, también es posible pensar que la formación de una densa capa alrededor de los granos de cemento retarda la posterior hidratación del cemento, cuando este proceso se lleva a cabo a temperaturas elevadas. De esta forma, los efectos adversos de la temperatura en la resistencia del hormigón también son debidos al bajo grado último de hidratación alcanzado cuando la hidratación del cemento se realiza a temperaturas altas. No obstante, ésta última conclusión podría ser cuestionada debido a que tal efecto de la temperatura en el grado de hidratación no ha sido observado en todos los casos.

2.6 MÉTODOS DE MINIMIZACIÓN DE LOS EFECTOS ADVERSOS

2.6.1 Consideraciones generales

Como se ha venido mencionando a lo largo de este capítulo, para poder evadir los problemas que conlleva la climatología cálida en los procesos de fabricación y de construcción, así como en las propiedades del hormigón en estado fresco y endurecido, es necesario aplicar algunas recomendaciones prácticas, sin tener en ningún caso una metodología o proceso sistemático aplicado.

La Instrucción Española de Hormigón Estructural [EHE, 1998] en su artículo 73 establece que: “Cuando el hormigonado se efectúe en tiempo caluroso, se adoptarán las medidas oportunas para evitar la evaporación del agua de amasado, en particular durante el transporte del hormigón y para reducir la temperatura de la masa. Para ello los materiales constituyentes del hormigón y los encofrados o moldes destinados a recibirlo deberán estar protegidos del soleamiento. Una vez efectuada la colocación del hormigón se protegerá éste del sol y especialmente del viento, para evitar que se deseeque. Si la temperatura ambiente es superior a 40°C o hay un viento excesivo, se suspenderá el hormigonado, salvo que, previa autorización expresa de la Dirección de Obra, se adopten medidas especiales”.

Por ejemplo podemos citar los siguientes artículos: [Malisch, 1990], [Kay y Slater, 1995], en los cuales se hacen varias recomendaciones de carácter práctico. A continuación se resaltan los aspectos más significativos de dichas publicaciones:

La clave para tener éxito en las tareas de hormigonado en climas cálidos es llevar a cabo una debida planeación y preparación. Mediante una cuidadosa selección de materiales y procesos de construcción, los fabricantes de hormigón y los usuarios de éste podrán evitarse muchos problemas.

Etapa de fabricación, entrega y descarga del hormigón

Los primeros pasos para controlar la temperatura del hormigón son llevados a cabo en la central de hormigonado. La disminución en la temperatura del hormigón reducirá la demanda de agua y la pérdida de trabajabilidad, aumentará los tiempos de fraguado y reducirá la probabilidad de fisuración por retracción plástica. A continuación se dan algunas recomendaciones básicas en esta etapa:

- Minimizar el contenido de cemento por medio de aditivos reductores de agua y cenizas volantes como substitutos de cemento. También es recomendable utilizar cementos con tamaño de partículas gruesos.
- Utilizar retardantes para controlar los tiempos de fraguado, sobre todo en tiempos de trayecto largos.

- Si es necesaria una alta trabajabilidad, hay que considerar la utilización de aditivos reductores de alto rango, estos aditivos reducen además la fricción entre partículas de áridos durante el amasado, disminuyendo la generación de calor en el hormigón.
- Utilizar cementos de bajo calor de hidratación (por ejemplo tipo II o IV ASTM) y evitar utilizar cementos de alta resistencia inicial (por ejemplo tipo III ASTM).
- Crear “sombras” en los acopios de áridos y rociarlos con agua fría.
- Cuando las condiciones de calor sean extremas podrá utilizarse agua helada como agua de amasado, incorporar parte de esta agua en forma de hielo o enfriar el hormigón con nitrógeno líquido.
- Agilizar las tareas de entrega y descarga de hormigón.
- Mantener un estricto control sobre todos los movimientos de los camiones de hormigón (rutas y tiempos), la mejor opción es dotarlos mediante un sistema de control satelital (GPS).
- Limitar el amasado a 100 revoluciones a la *velocidad de mezclado* especificada por el fabricante del camión (*velocidad de mezclado*, aproximadamente 6 a 18 revoluciones por minuto).
- En condiciones de calor extremas, considerar posponer el amasado hasta llegar al sitio de la obra, es decir, cargar los materiales dentro del camión sin hacer girar el tambor y cargando el cemento en último lugar.
- Pintar los tambores del camión de blanco con el objeto de evitar una alta absorción solar y consecuentemente un calentamiento del hormigón.
- Cuando sea posible, programar los pedidos de hormigón evitando los segmentos horarios de mayor temperatura. En climas áridos, el hormigón colocado después de medianoche es expuesto a menores temperaturas, lo que es benéfico para sus propiedades. De igual forma, el fraguado final sobreviene cerca del amanecer cuando la humedad relativa es más alta, lo que también tiene beneficios desde el punto de vista de curado y de retracción plástica del hormigón.
- No adicionar nunca mas agua de la especificada.

Ensayos e inspección de calidad

Durante las operaciones de hormigonado en climas cálidos, los productores de hormigón, así como los contratistas suelen ser castigados por los errores de otros. Si las probetas testigo son manejadas inadecuadamente, la resistencia de éstas se verá

reducida, lo que traerá problemas al fabricante de hormigón y al contratista o constructor.

Por la naturaleza propia del control de calidad del hormigón preparado, se tienen algunos problemas añadidos en este sentido, debidos a: la indebida manipulación de pequeñas cantidades de hormigón (5,3 litros por probeta aproximadamente), el empleo de moldes metálicos que absorben y transmiten el calor con suma facilidad, la evaporación de agua por la cara abierta de las probetas, etc.

Respecto a esto último, la [Norma UNE 83-301-91](#) en su apartado 7 dice textualmente: “Con el fin de evitar la desecación de la masa, las probetas se han de mantener en sus moldes, con su superficie cubierta de arpillera húmeda o similar y protegidas de la intemperie, de forma que la temperatura alrededor de las probetas esté comprendida entre 16 y 27 °C, debiendo quedar reflejado en el parte de toma de muestras las condiciones de conservación de temperatura y humedad de las probetas en obra”. Actualmente está en vigor una nueva Norma que la sustituye, la [Norma UNE-EN 12390-2:2001](#) que en su apartado 5.5.1 especifica “... las probetas se mantendrán en el molde... a una temperatura de 20 ± 5 °C y a 25 ± 5 °C en climas cálidos...”; en esta Norma el rango de la temperatura de conservación es mas amplio pudiéndose conservar como máximo hasta a 30°C en épocas de calor y como mínimo hasta 15°C en épocas de frío.

Por otro lado, cara a controlar mejor la calidad del hormigón en la planta y en la obra, a continuación se brindan las siguientes recomendaciones:

- Realizar ensayos de asentamiento, contenido de aire y elaborar las probetas testigo inmediatamente después de obtener la muestra de hormigón.
- Proteger las probetas de los rayos del sol y almacenar las probetas bajo las condiciones estandarizadas.
- Proteger los moldes con plástico una vez fabricadas las probetas de hormigón.
- Registrar frecuentemente la temperatura ambiente, la temperatura del hormigón y la humedad relativa.
- Registrar la cantidad total de agua añadida a la mezcla y sus tiempos de amasado.
- Hora de amasado, de comienzo y de final de la descarga.
- Temperatura del hormigón en el momento del suministro y después de haberse colocado.
- Observaciones sobre el aspecto y el comportamiento del hormigón en el momento del suministro y después de haberse colocado.

- Consistencia del hormigón en el momento de la entrega y en la descarga.

2.6.2 Pre-enfriamiento de los materiales constituyentes del hormigón

Cuando el hormigón es colocado a temperaturas iniciales de la mezcla bajas la temperatura máxima alcanzada durante el proceso de fraguado será menor. Por otra parte, el hormigón vertido a temperaturas más bajas es más fluido, con lo que puede reducirse el contenido de cemento y agua en un 5% aproximadamente. Además, los hormigones colocados a temperaturas más bajas desarrollan mayores resistencias a largas edades y poseen una mayor durabilidad. En la actualidad existen equipos eficientes para producir hormigones a temperaturas iniciales menores de 8 °C en tiempo caluroso. [Calmon, 1995]

Sea el proceso que se utilice, el enfriamiento del hormigón no es nunca un proceso fácil. Los áridos, que representan del 60 al 80% del volumen en el hormigón, absorben el calor muy fácil y rápidamente debido a su bajo calor específico. [Beaver, 2004], [Lee, 1989], [Nambiar y Krishnamurthy, 1984] En general, los tratamientos para reducir la temperatura del cemento no son considerados muy efectivos; puede esperarse que el cemento recién fabricado pierda una parte considerable de calor durante el transporte al silo de almacenamiento de la obra, que en ocasiones puede llegar a unos 55 °C o más. Asimismo, estos silos pueden pintarse de blanco con el objeto de que la radiación solar incidente sea reflejada, especialmente en verano, y no incremente la temperatura del cemento.

Para reducir la velocidad de pérdida de trabajabilidad y posteriormente el calentamiento del hormigón debido a las reacciones de hidratación, los productores suelen reemplazar parte del cemento con cenizas volantes o adiciones minerales. Los aditivos retardantes también pueden ayudar a controlar los tiempos de fraguado y la demanda de agua del hormigón. [Beaver, 2004], [Gajda y Vangeem, 2002], [Calmón, 1995]

Haciendo referencia a los métodos tradicionales de enfriamiento, hasta hace poco los productores de hormigón elegían el agua helada o hielo machacado para enfriar el hormigón. Estos métodos sin embargo, tienen muchas limitaciones y su implementación puede ser algo costosa, aparte de que el nivel de enfriamiento logrado no es muy alto y en ocasiones la consistencia obtenida no es uniforme. [Beaver, 2004]

Enfriamiento de los áridos por evaporación

Simplemente empapando los acopios de áridos con agua, estos pueden ser enfriados por evaporación, sin embargo la efectividad de este proceso está limitada al nivel de humedad relativa. Un árido húmedo no se enfría tanto en un clima húmedo debido a que la humedad relativa es mayor y la evaporación menor. Asimismo, utilizando este método de enfriamiento de áridos, no será posible bajar su temperatura más allá de la temperatura ambiental medida con bulbo húmedo. [Lee, 1989]

Utilización de agua fría

La utilización de agua fría para la producción de hormigón preparado puede hacerse mediante dos formas: ya sea que los áridos sean empapados en agua fría por un período de tiempo, o bien, rociándola directamente sobre éstos. En ambos casos, se deberá dar el tratamiento un tiempo suficiente para dejar escurrir el agua excedente, si no la trabajabilidad y la resistencia serán más difíciles de controlar. [Nambiar y Krishnamurthy, 1984]

Algunos productores de hormigón objetan la utilización del enfriamiento de los áridos con agua debido a que esto podría variar la humedad de los áridos y consecuentemente, reducir la homogeneidad en la consistencia y en la resistencia mecánica. Sin embargo, al empapar los acopios con agua fría se logra que el conjunto de áridos tenga un contenido de humedad más uniforme, a diferencia de los acopios de áridos “secos”, en los cuales el contenido de humedad varía mucho de un lugar a otro. Este proceso también mejora la calidad del hormigón debido a que no será necesaria tanta agua para dar una trabajabilidad especificada, por lo tanto el contenido de cemento podrá ser menor evitando algunos efectos negativos como la retracción o la pérdida de resistencia. [Lee, 1989], [Schrader, 1987]

Adición de hielo

El hielo puede ser utilizado como sustitución parcial o total del agua de amasado con el objeto de disminuir la temperatura del hormigón. El hielo puede estar machacado o en “hojuelas” de no más de 10 mm de tamaño, lo cual hace que el hielo se mezcle totalmente en la masa del hormigón antes de que este sea vaciado y colocado. Se ha registrado experimentalmente [Nambiar y Krishnamurthy, 1984] que la temperatura del hormigón fresco puede ser reducida en 1 °C mediante la adición de aproximadamente 7 kg de hielo por metro cúbico.

Utilización de nitrógeno líquido

La utilización de nitrógeno líquido como proceso para enfriar el hormigón comenzó hace más de 20 años, sin embargo nunca ha sido un proceso muy asequible y tu utilización deja lugar a cierto escepticismo. Este método, el cual puede llegar a ser un proceso menos costoso para reducir la temperatura del hormigón, es muy sencillo. Simplemente hay que instalar un tanque presurizado de acero conectado a una lanza o tubería de inyección. Ésta tubería de inyección se mete dentro del tambor del camión con el hormigón ya mezclado y en reposo y se rocía sobre la superficie de éste sin ser penetrada a la masa del hormigón.

El nitrógeno líquido, como su nombre lo indica, es simplemente gas nitrógeno convertido a estado líquido. Dentro del ámbito de enfriamiento del hormigón, el atractivo de utilizar nitrógeno líquido es que este disminuye mucho más la temperatura del hormigón que el agua helada o el propio hielo. Además de que debido a que es un

material inerte, se cree que no tiene ninguna reacción negativa con el hormigón, sino que simplemente lo enfría.

Como todo proceso que no es utilizado con frecuencia, el enfriamiento del hormigón con nitrógeno líquido no es todavía propiamente controlado y utilizado de la mejor manera industrialmente. Existen algunos riesgos de seguridad como la posible fractura del tambor de acero del camión o el daño a las personas que trabajan con él, ya que se está trabajando con un líquido criogénico. De igual forma, es necesario estudiar más y entender como el nitrógeno líquido afecta a los productos de hidratación del cemento, al fraguado, y al endurecimiento y los equipos de producción de hormigón. [Beaver, 2004]

En general, se puede hacer referencia a tres tipos de sistema de pre-enfriamiento utilizando nitrógeno líquido: [Calmon, 1995]

- Preenfriar los componentes del hormigón (el nitrógeno líquido es utilizado para enfriar el agua de amasado, crear hielo y enfriar los áridos).
- Preenfriar el hormigón durante el amasado (en este caso el nitrógeno líquido es inyectado dentro de la amasadora en la central de hormigonado).
- Preenfriar el hormigón antes de su puesta en obra (el nitrógeno líquido es inyectado directamente dentro del tambor de amasado del camión).

Por otro lado, algunos investigadores están investigando la utilización de nitrógeno líquido para enfriar los áridos, ya que el enfriamiento de éstos es más efectivo que enfriar otros componentes del hormigón.

2.6.3 Post-enfriamiento y enfriamiento artificial

Otro método existente, aunque aplicado a los elementos estructurales de hormigón en masa, son los sistemas de tuberías de enfriamiento, las cuales son utilizadas generalmente para reducir la temperatura del hormigón masivo, sobre todo a nivel interior.

Este método puede ser costoso pero podría ser viable si se optimiza adecuadamente el sistema. Algunas veces, si el sistema no ha sido bien diseñado, podrían generarse tensiones térmicas que podrían fisurar interna o superficialmente al hormigón. [Gajda y Vangeem, 2002] Este tipo de sistemas funcionan con agua o con aire frío. [Groth and Hedlund, 1998]

Otro inconveniente de este sistema es que la técnica de post-refrigeración acorta significativamente los tiempos de liberación del calor, pero no las temperaturas alcanzadas, dado que la refrigeración se inicia cuando los hormigones han alcanzado una madurez suficiente y se ha producido la mayor parte del calor de hidratación. En el

sistema de post-enfriamiento se persigue disipar el calor durante los dos o tres primeros días después del hormigonado. La utilización de dicho método acelera la disipación de calor en el período de enfriamiento de las estructuras de hormigón (masivo) durante las edades iniciales.

2.6.4 Reducción del contenido de cemento, sustitución parcial del cemento por puzolana y utilización de cemento de bajo calor de hidratación

La elevación interna de la temperatura en el hormigón proviene de la hidratación del cemento, así que, cuanto menor sea el contenido de cemento menor será el incremento de temperatura en el hormigón. Uno de los métodos más simples para controlar el aumento de temperatura en la masa del hormigón es usando el mínimo contenido de cemento posible [O'Donell y O'Brien, 2003], o también mediante la optimización del contenido de cemento. Este hecho tiene repercusiones también desde el punto de vista mecánico, ya que un menor contenido de cemento reduce la fisuración en primeras edades.

Las puzolanas que entran sustituyendo parte del cemento presentan amplias variaciones en el desarrollo de calor y también varían con los diferentes cementos con los que se combinan. La generación de calor de las mezclas de cemento y puzolanas debe determinarse a través de ensayos de laboratorio. En principio, puede sustituirse por cenizas volantes hasta un 30 o 50% del cemento ordinario, produciéndose una moderada reducción de la resistencia inicial. De manera aproximada, puede decirse que un 30% de sustitución de cemento por puzolana reducirá la generación de calor en un 15% aproximadamente. [Calmon, 1995]

Diferentes investigaciones, así como la experiencia, han demostrado que la utilización de puzolanas o cenizas volantes de buena calidad, sustituyendo parte del cemento Portland, mejora muchas de las propiedades del hormigón. Las puzolanas mejoran la trabajabilidad, disminuyen el calor de hidratación, disminuyen la retracción, mejoran la resistencia al ataque de los sulfatos, evitan la exudación en mezclas pobres, reducen y evitan la expansión causada a través de la reacción de ciertos áridos (reactivos) con los álcalis del cemento, mejoran la impermeabilidad y reducen los costes. [Ujhelyi y Ibrahim, 1991]

Respecto a la utilización de cementos de bajo calor de hidratación, cabe señalar que cuando se controla la composición química del cemento, entonces la velocidad de generación de calor y el incremento total de temperatura pueden reducirse significativamente.

Los varios tipos de cementos existentes pueden generar cantidades de calor diferentes. La fabricación de hormigones con cementos de bajo calor de hidratación es siempre una buena elección. Los hormigones de bajo calor de hidratación también pueden ser fabricados mediante el máximo nivel permitido de sustitución de puzolanas y la mínima cantidad posible de material cementante para lograr las especificaciones de

cada proyecto. Las cenizas volantes generan cerca de la mitad de calor que el cemento que substituyen y frecuentemente son utilizadas como reemplazo en un 15 a 25%, la escoria de alto horno es frecuentemente utilizada como reemplazo en un 65 a 80%. [Gajda y Vangeem, 2002]

Se suelen utilizar cementos de moderado calor de hidratación (tipo II ASTM) con un calor de hidratación máximo entre 70 y 80 cal/g para edades de 7 y 28 días, respectivamente. También puede utilizarse cemento de bajo calor de hidratación (tipo IV ASTM) que presenta un calor de hidratación máximo entre 60 y 70 cal/g para edades de 7 y 28 días respectivamente.

2.6.5 Control de la finura del cemento

La finura del cemento afecta fundamentalmente a la velocidad de liberación de calor y no tiene efectos sobre la cantidad final liberada de calor. Determinados ensayos experimentales han demostrado que cuanto más fino sea el cemento, más alta será la resistencia del hormigón a todas las edades, y no solamente en edades iniciales. [Price, 1951] En aquellas situaciones en las cuales la temperatura de la masa fresca del hormigón esté por debajo de los 7 °C y el contenido de cemento sea bajo, resulta beneficioso el emplear cemento con mayor finura debido a su efecto acelerante sobre las reacciones de hidratación.

En el caso del hormigonado en climas cálidos una alta finura del cemento es contraproducente, ya que el calor de hidratación generado será mayor, en este caso es conveniente la utilización de cementos más gruesos. Asimismo, en los hormigones de altas prestaciones, un cemento más grueso proporciona un mejor desempeño, de igual forma se tienen ahorros substanciales en la energía de molienda, lo que trae beneficios ecológicos y de costes. [Bentz y Haecker, 1999] Lo anterior implica que la finura del cemento debería ser optimizada en función de las proporciones del diseño del hormigón a utilizar, en este caso refiriéndonos a un hormigón específico para períodos estivales.

Por otro lado, existen actualmente algunas modificaciones hechas a los cementos como en el caso de los cementos esféricos. El cemento esférico es un cemento que se caracteriza por tener partículas redondeadas. Este tipo de cemento puede mejorar algunas de las propiedades del hormigón tales como la trabajabilidad, la permanencia de la consistencia con el tiempo, los tiempos de fraguado y una disminución en el incremento de la temperatura adiabática, debido a que para lograr una determinada resistencia, se utiliza una cantidad menor de cemento en relación a la utilizada normalmente con un cemento normal; esto también presenta ventajas desde el punto de vista económico y ecológico.

En este sentido, [Tanaka et al., 1999] examinaron y compararon algunas de las propiedades fundamentales de este cemento (forma de partículas, distribución de tamaños, propiedades químicas, cantidad de adsorción de superplastificante e hidratación inicial) con las de un cemento ordinario. Asimismo fueron comparadas

algunas propiedades de hormigones en estado fresco fabricados con estos dos tipos de cemento, en relación a la trabajabilidad, tiempos de fraguado e incremento de la temperatura adiabática.

En los resultados obtenidos pudo observarse que los valores de trabajabilidad y de pérdida de trabajabilidad en el tiempo alcanzados por el hormigón fabricado con cemento esférico eran mejores. Por otro lado, el incremento de temperatura adiabática en el hormigón fabricado con cemento esférico fue menor en aproximadamente 6 °C al fabricado con cemento ordinario; esto se debe a la menor cantidad de cemento utilizado para obtener la misma resistencia, lo que hace al cemento esférico apto para utilizarse en hormigones de bajo calor de hidratación y en estructuras masivas.

2.6.6 Hormigonado nocturno

Hasta el momento se han presentado métodos de refrigeración que aceleran el enfriamiento del hormigón. El hormigonado en período nocturno es una medida preventiva indirecta de actuación sobre la temperatura ambiente, y en general, sobre las condiciones climáticas. Este método es considerado pasivo y de efecto limitado, pudiendo emplearse en obras cuya moderada envergadura permita la reducción horaria y no justifique otros métodos más directos.

Al hormigonar temprano por la mañana se tiene la ventaja de que los encofrados y los materiales (áridos, cemento, agua) estén fríos, teniendo una baja temperatura inicial del hormigón. Sin embargo, el hormigón deberá ser acabado y curado antes de que la temperatura suba demasiado.

Si el elemento es muy masivo o extenso, puede ser mejor hormigonar por la tarde, haciendo que el hormigón esté sujeto al frío de la tarde y noche. No obstante en este caso tenemos la desventaja de que los materiales constituyentes y los encofrados están calientes, lo que hará que el hormigón tenga una temperatura inicial alta. [Turton, 1995], [Kay y Slater, 1995], [Schrader, 1987]

2.6.7 Consideraciones para la dosificación

Las proporciones de los distintos componentes en la mezcla se debe obtener como resultado de estudios de laboratorio, de manera que bajo las condiciones de colocación previstas (condiciones ambientales, formas y tiempos de transporte, sistemas de compactación, sistemas de curado, etc.) se alcancen las características especificadas para el hormigón. A continuación se citan algunas reglas básicas para una correcta dosificación en condiciones de clima cálido: [Vaquero, 2003]

- El contenido de cemento debe mantenerse tan bajo como sea posible para alcanzar los requisitos de resistencia mecánica y durabilidad exigidos al elemento estructural.

- Debe considerarse la posibilidad de utilizar adiciones al hormigón, como cenizas volantes, con el fin de ralentizar la elevación de la temperatura del hormigón durante su fraguado.
- Debe tenerse en cuenta que la utilización de elevadas proporciones de aditivos plastificantes y/o superplastificantes puede causar retrasos en el fraguado del hormigón.
- En caso de que vayan a producirse retrasos inevitables o que las distancias de transporte sean considerables, los aditivos utilizados deberán mantener su efecto durante el mayor tiempo posible.
- Dentro de los áridos disponibles desde una consideración económica, deben seleccionarse aquellos que produzcan una menor demanda de agua en el hormigón, y que presenten unas propiedades térmicas más adecuadas.

2.7 DISCUSIÓN

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 características físicas afectadas (desde el enfoque de esta tesis doctoral) son, principalmente la trabajabilidad y la resistencia a compresión, sin embargo existen otros problemas relacionados con estas dos propiedades del hormigón, en estado fresco y endurecido.

Los factores asociados a esta problemática a nivel tanto industrial como tecnológico, inciden de distintas formas y sobre los diferentes constituyentes del hormigón. Asimismo cada constituyente del hormigón tiene cierto nivel de influencia sobre el grado de afectación final del producto por la temperatura. En este caso se verifica mediante diversas fuentes de información, que el constituyente que mayor influencia tiene sobre el comportamiento del hormigón, en función de las condiciones ambientales, es el árido; el cual constituye entre un 70 u 80% de la masa del hormigón. De igual forma, el factor humano es de gran importancia en este problema, ya que muchas veces la forma de manejar el hormigón y los procesos relacionados con la producción, transporte, puesta en obra, etc., se ven afectados a su vez por los efectos que el calor, también causa sobre los seres humanos.

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. Específicamente, una mayor temperatura hace que la microestructura creada tenga una morfología y una porosidad menos adecuada para el posterior funcionamiento mecánico y de durabilidad. En relación a las prestaciones del hormigón en estado fresco, una alta temperatura reduce los tiempos de fraguado, el asentamiento inicial y en el tiempo del hormigón, y la posible fisuración de éste debida a la retracción.

Después de realizar el análisis de los métodos de minimización de los efectos adversos 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, es evidente que las actuaciones antes referidas no evitan el problema sino que solo reducen los efectos que se producen.

Tomando en cuenta algunas de estas metodologías aquí consideradas, la mayoría de ellas se caracterizan por tener un incremento sobre el coste final de producción del hormigón. Por lo tanto, debido al enfoque industrialmente práctico de esta tesis se persiguió desarrollar una alternativa más económica y eficiente en el sentido de implementar actuaciones y políticas de gestión en la producción del hormigón, tratando de tener al final mayores beneficios.

En este sentido, se pretende elaborar una metodología de actuación a nivel industrial que evite al máximo las pérdidas de resistencia del hormigón en períodos estivales. Todo lo anterior tomando en cuenta la factibilidad técnica y económica de las soluciones propuestas.