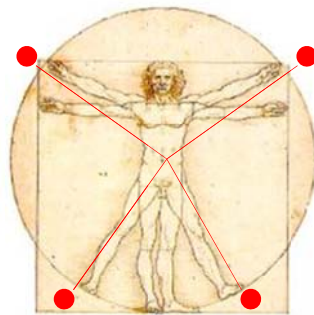


# TECNOLOGÍ@ y DESARROLLO

*Revista de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente*

VOLUMEN XIII. AÑO 2015

SEPARATA



## ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE FACTORES AMBIENTALES EN LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN ARMADO

**Alfonso Prieto González , Javier Morales Pérez**



UNIVERSIDAD ALFONSO X EL SABIO  
Escuela Politécnica Superior  
Villanueva de la Cañada (Madrid)

© Del texto: Alfonso prieto González, Javier Morales Pérez

Julio, 2015.

<http://www.uax.es/publicacion/analisis-de-la-influencia-de-factores-ambientales-en-la-resistencia-a-compresion.pdf>

© De la edición: *Revista Tecnológ@ y desarrollo*

Escuela Politécnica Superior.

Universidad Alfonso X el Sabio.

28691, Villanueva de la Cañada (Madrid).

ISSN: 1696-8085

Editor: Javier Morales Pérez – [tecnologia@uax.es](mailto:tecnologia@uax.es)

No está permitida la reproducción total o parcial de este artículo, ni su almacenamiento o transmisión ya sea electrónico, químico, mecánico, por fotocopia u otros métodos, sin permiso previo por escrito de la revista.

# **ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE FACTORES AMBIENTALES EN LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN ARMADO**

**Alfonso Prieto González (a), Javier Morales Pérez (b)**

(a) Master en Ingeniería Ambiental e Ingeniero de Edificación por la Universidad Alfonso X el Sabio. Arquitecto Técnico por la Universidad Politécnica de Madrid

(b) Doctor por la Universidad Politécnica de Madrid. Licenciado en Ciencias Biológicas. Coordinador de las carreras de Ciencias Ambientales. Universidad Alfonso X el Sabio.

**RESUMEN:** El efecto de los factores ambientales en las propiedades físicas y mecánicas del hormigón endurecido es un hecho conocido y existe numerosa bibliografía al respecto. Asimismo, también son conocidas las medidas a tomar durante la puesta en obra y curado del hormigón. A pesar de que se han realizado muchos ensayos y campañas experimentales en laboratorio, no se han realizado estudios con datos reales de obras durante periodos prolongados de tiempo que analicen la influencia significativa de los diferentes parámetros medioambientales en la resistencia a compresión del hormigón. En este artículo, se analiza la influencia de dichos factores en la resistencia a compresión del hormigón como base para una posterior propuesta metodológica a desarrollar para optimizar recursos y homogeneizar productos.

**PALABRAS CLAVE:** hormigón, resistencia, temperatura, humedad relativa, anova.

**ABSTRACT:** The effect of environmental factors in the physical and mechanical properties of hardened concrete is well known and there is a lot of bibliography about it. Likewise, the steps to take are also known during execution and mature. Spite of there are a lot of laboratory experiments, there aren't studies with real datas from sites in a long term period that analyze the influence of environmental parameters in the strenght of hardened concrete. In this article, it is analyzed the influence of that factors as a base of a future proposal methodology for optimization of resources and products homogeneity.

**KEY-WORDS:** concrete, strength, temperature, relative humidity, anova.

## **SUMARIO:**

1. Introducción
2. Esfuerzos térmicos
3. Metodología de la investigación
4. Resumen de los análisis realizados
5. Conclusiones
6. Bibliografía

## 1. Introducción

El hormigón, que desde hace décadas es el material de construcción más utilizado para estructuras a nivel mundial, está formado por la mezcla de cemento, agua, áridos y, muy habitualmente, aditivos con diferentes funciones. Es decir, que se trata de un material heterogéneo, anisótropo, y en el que en el proceso desde la extracción de materias primas hasta su colocación en obra intervienen muchos factores que pueden afectar a las propiedades mecánicas del hormigón endurecido.

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 éstos actúan. La influencia de la temperatura y otras condiciones ambientales en la resistencia a compresión del hormigón es bien conocida y está documentada a nivel nacional e internacional. Se sabe que las altas temperaturas, en conjunción con otros factores, provocan minoraciones en las resistencias a compresión, quedando reflejado en numerosas instrucciones de distintos países en el apartado relativo al hormigonado en tiempo caluroso.

En general, la combinación de altas temperaturas, baja humedad relativa y viento son condiciones que puede derivar en problemas de puesta en obra del hormigón y de minoración de sus propiedades mecánicas.

## 2. Esfuerzos térmicos

Los esfuerzos térmicos que se generan en las primeras edades del hormigón han sido la principal causa de roturas prematuras desde comienzos del siglo XX, y sigue siendo un problema hoy en día (Lange y Altoubat, 2003). Esa rotura potencial ha sido origen de muchas investigaciones durante décadas. Los primeros intentos para predecir las temperaturas en el hormigón durante la hidratación fueron desarrollados por Yoshida en 1921. En los años cincuenta, Rastrup propuso uno de los primeros modelos de hidratación que incorporaban la influencia de la temperatura y el grado de hidratación en el modelo.

Más recientemente ha habido más investigaciones para predecir el calor y la rotura potencial en elementos de hormigón. Algunas de ellas se han centrado en los efectos que las adiciones del cemento o los aditivos tienen en las hidratación del cemento, que es un tema que no había sido tratado hasta la fecha en profundidad. Otras han desarrollado modelos de hidratación que pueden utilizarse para análisis térmicos de

elementos de hormigón, incluyendo algunas aplicaciones informáticas. También ha habido muchas discusiones sobre la sensibilidad de la temperatura en sistemas cementosos, así como otras sobre el uso de la calorimetría como herramienta para el análisis de la hidratación.

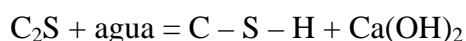
En términos generales, hay tres cosas que es necesario saber para ser capaces de predecir el calor de hidratación en elementos de hormigón, que son:

- Conocimiento del calor total de hidratación desarrollado por el elemento, y la velocidad a la que ocurre.
- Conocimiento del desarrollo de esfuerzos en el hormigón fresco.
- Conocimiento de las dimensiones del elemento y sus condiciones de contorno.

### ***2.1.Hidratación del cemento***

La hidratación del cemento es un conjunto de reacciones exotérmicas que tienen lugar cuando el cemento y el agua se mezclan. Esta reacción puede liberar grandes cantidades de energía (hasta 500 Julios por gramo de cemento) que pueden causar grandes gradientes térmicos debido a que el hormigón es un mal conductor térmico (Neville, 1995). Esto último es aún más cierto cuando las condiciones ambientales enfrían la superficie del elemento de hormigón.

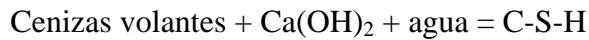
Hay dos reacciones principales de interés que tienen lugar cuando el cemento se hidrata. Estas dos reacciones implican una reacción entre el agua y los silicatos bicálcicos y los silicatos tricálcicos para formar silicatos de calcio hidratados y cal hidratada, como se muestra en las siguientes ecuaciones simplificadas:



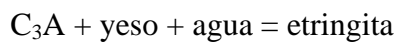
El producto de las reacciones es la formación de silicatos hidratados (C-S-H), que pueden ser del orden del 50 al 60% del volumen de la pasta hidratada. Estos silicatos controlan la resistencia y la durabilidad del hormigón fresco. La composición exacta varía en función de algunos factores, incluyendo la edad, o la presencia de otros componentes del cemento (Neville, 1995).

Un segundo producto, el hidróxido de calcio ( $Ca(OH)_2$ ), también se forma en las reacciones de hidratación. Es un compuesto menos denso que los silicatos hidratados, y no contribuye prácticamente a la resistencia de la pasta. Sin embargo, en presencia de cenizas volantes, este hidróxido de calcio reacciona produciendo silicatos hidratados adicionales, lo que aumenta la densidad del hormigón. Esta reacción tiene lugar de una

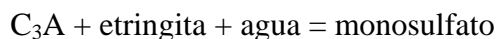
manera mucho más lenta que las reacciones del silicato bicálcico y del silicato tricálcico.



También se producen reacciones secundarias que implican al aluminato tricálcico ( $\text{C}_3\text{A}$ ) y al aluminoferrato tetracálcico ( $\text{C}_4\text{AF}$ ). Estas fases están presentes no porque sean importantes para el desarrollo de resistencias del cemento, sino porque actúan como catalizadores en la formación de silicatos de calcio durante el proceso de producción del cemento (Neville, 1995). Las reacciones del aluminato tricálcico son las más interesantes, ya que si se descontrolan pueden dar lugar a un endurecimiento inmediato del cemento debido a una falta de en el cemento. Las reacciones son las siguientes:



Esta reacción se produce hasta que el yeso se agota, y en ese punto la etringita se vuelve inestable. En ese punto, el  $\text{C}_3\text{A}$  continuará reaccionando con la etringita para producir monosulfato, que es un producto estable.



SI todavía queda  $\text{C}_3\text{A}$  toda la etringita se convierte en monosulfatos, el  $\text{C}_3\text{A}$  reacciona con el agua produciendo aluminato de calcio hidratado (C-A-H).



## ***2.2. Factores que influyen en la hidratación***

Hay un gran número de factores que pueden afectar a la hidratación. Podemos incluir (sin que sea una lista exhaustiva):

- Temperatura y humedad ambiente durante el curado.
- La temperatura del hormigón fresco al colocarlo en obra.
- La dosificación y tipo de cemento.
- La presencia de adiciones en el cemento.
- La relación agua / cemento.
- El uso de aditivos, especialmente aceleradores y retardadores del fraguado.

De todos esos factores, solamente algunos pueden controlarse y manipularse para solucionar el posible problema de fisuraciones de origen térmico. Estos incluyen el tipo de cemento elegido, la presencia de adiciones y la relación agua / cemento. La temperatura a la que llega el hormigón a obra también puede ser controlada añadiendo, por ejemplo, hielo en el agua de amasado o refrescando los áridos. El resto de factores suelen ser fijos para una situación determinada.

### ***2.3. Influencia de factores externos***

Al analizar el hormigón en condiciones reales, hay que tener en cuenta la influencia que tienen los factores externos en el comportamiento del hormigón. Entre los factores externos que pueden afectar tenemos el volumen de hormigón, temperatura ambiental, humedad relativa, superficie expuesta, conductividad del hormigón, etc..., por lo que es necesario conocer estos valores para poder hacer una predicción sobre el desarrollo del calor del hormigón (Morabito, 1998).

#### ***2.3.1. Hormigonado en tiempo caluroso***

La mayoría de los problemas asociados a la colocación del hormigón en tiempo caluroso tienen relación con el incremento del ratio de hidratación del cemento a altas temperaturas y el incremento de la evaporación del hormigón fresco.

Las propiedades del hormigón que pueden verse afectadas son por el hormigonado en tiempo caluroso son:

- Tiempo de puesta en obra: cuando aumenta la temperatura, los tiempos de puesta en obra, compactación y acabado del hormigón disminuyen.
- Trabajabilidad: las altas temperaturas reducen la trabajabilidad del hormigón.
- Resistencia a compresión: La alta demanda de agua y la alta temperatura del hormigón puede derivar en una minoración de la resistencia a 28 días.
- Temperatura del hormigón: las condiciones de tiempo caluroso pueden acentuar las temperaturas alcanzadas en el hormigón debido al calor de hidratación. En secciones grandes los gradientes térmicos en los elementos pueden causar roturas por efectos térmicos.
- Calidad de acabado superficial : con el incremento del ratio de evaporación, la superficie del hormigón se secará y endurecerá antes. Esto conllevará un acabado prematuro de la superficie, atrapando más agua en la mezcla. La compactación y acabado final pueden hacer salir el agua atrapada, produciéndose desconchones.
- Grietas por retracción plástica: Las condiciones de hormigonado en tiempo caluroso aceleran la pérdida de humedad de la superficie del hormigón. Si el ratio de evaporación es superior al ratio al cual el agua alcanza la superficie, se puede secar esta, dando como resultado la retracción del hormigón. Cuando los esfuerzos por retracción superan la tensión que es capaz de soportar el hormigón fresco se produce la rotura.

- Roturas por gradientes térmicos: Los cambios bruscos de temperatura en las primeras edades del hormigón pueden derivar en roturas por efecto del gradiente térmico entre la superficie (por enfriamiento brusco) y el interior (más caliente por el calor de hidratación).

Para minimizar los efectos negativos en la resistencia a compresión y en otras propiedades del hormigón se pueden llevar a cabo diferentes acciones, entre otras:

- Control de la temperatura del hormigón: la instrucción EHE especifica en su artículo 73 que cuando la temperatura ambiente es superior a 40°C, se suspenderá el hormigonado salvo que se adopten medidas especiales que merezcan la aprobación de la Dirección de Obra. Hay muchas opciones para controlar la temperatura del hormigón, incluyendo ajustar la temperatura de los componentes o enfriando la mezcla.
- Los áridos son la parte más importante en volumen del hormigón y tienen la mayor capacidad calorífica, por lo que tienen grandes efectos en la masa fresca del hormigón. Por desgracia, la temperatura de los áridos es difícil de controlar. Se puede mejorar disponiendo de elementos que les proporcionen sombra en verano o incluso refrescando los áridos mediante rociadores. La temperatura del cemento no suele contribuir significativamente a la temperatura de la mezcla debido al bajo calor específico y al poco porcentaje en volumen que representa. Inyecciones de nitrógeno líquido en la mezcla también pueden utilizarse, así como añadir hielo al hormigón fresco. Evidentemente, estos últimos procesos solamente son viables económicamente en grandes proyectos.
- Aditivos: varios tipos de aditivos pueden utilizarse de forma beneficiosa en tiempo caluroso. Los reductores de agua (plastificantes) se pueden utilizar para reducir la cantidad de agua o para mejorar la trabajabilidad. Esto permite una rápida colocación en obra y compactación con efectos beneficiosos en la resistencia y durabilidad. Los retardadores dejan más tiempo para la colocación en obra y acabado superficial. No obstante hay que tener cuidado con los retardadores si se prevén condiciones que favorezcan el rápido secado superficial, ya que aparentemente la superficie puede aparentar estar lista para realizar el acabado mientras que el interior está todavía fresco. Esto puede afectar a la uniformidad de la superficie de acabado.
- Tipo de cemento: la elección de algunos tipos de cemento puede proporcionarnos condiciones más beneficiosas en tiempo caluroso. La utilización de cementos de bajo calor de hidratación con bajo ratio de desarrollo de calor nos puede proporcionar un tiempo adicional para colocar



el hormigón, reduciendo la temperatura y el riesgo de roturas por gradientes térmicos cuando se enfría la superficie.

- Contenido de cemento: el incremento de temperatura debido al calor de hidratación del cemento es proporcional al contenido de cemento. Este debe ser limitado para garantizar los requisitos de resistencia y durabilidad.

### 2.3.2. *Influencia de la humedad relativa del aire*

Como es bien conocido, la humedad relativa presenta un comportamiento inversamente proporcional a la temperatura, es decir, cuando la temperatura baja, la humedad relativa sube y cuando la temperatura sube, la humedad relativa decrece, siendo este último caso el más perjudicial para el hormigón. En zonas de clima continental, como es el centro de la meseta, las condiciones atmosféricas en los meses de verano son de altas temperaturas y muy baja humedad relativa, presentando también gradientes importantes de temperatura entre el día y la noche.

La humedad relativa durante el curado del hormigón tiene gran influencia en las propiedades del hormigón endurecido. (Powers, 1947) encontró que la hidratación del cemento se reduce en forma importante cuando la humedad dentro de los poros capilares de la pasta de cemento cae por debajo del 80%; de esto concluyó que para que se den las condiciones de humedad que permitan el curado natural, la humedad del aire debe ser al menos de un 80% para evitar que haya un flujo de humedad del hormigón hacia el aire. Lo anterior únicamente sería válido si la evaporación no se diera por otras condiciones meteorológicas desfavorables como alta velocidad del viento y diferencias significativas entre la temperatura del hormigón y del aire.

La literatura sobre procedimientos constructivos y tecnología del hormigón (González, 2000; Mehta y Monteiro, 1998) realzan las virtudes del curado como una forma de obtener la mayor resistencia a la compresión en el concreto, parámetro universalmente aceptado para evaluar la calidad del material.

Los gradientes de humedad creados por la exposición del hormigón a atmósferas muy secas pueden causar gradientes de hidratación y porosidad. La extensión y severidad de esos gradientes dependerá de numerosos factores como la humedad relativa del aire, la temperatura, la velocidad del viento, la edad de exposición, la profundidad desde la superficie expuesta y la duración de la exposición. Si la humedad relativa en el aire circundante es bastante baja, la hidratación del cemento en la superficie expuesta, la hidratación del cemento en la superficie expuesta de un elemento puede cesar (Cebeci, 1987). Sin embargo, en el interior del hormigón, el cemento se sigue hidratando mientras haya agua disponible.

El agua será parcialmente consumida en el proceso de hidratación y otra parte se perderá en la superficie expuesta. (Powers, 1947) sugirió que la hidratación del cemento cesa virtualmente cuando la presión de vapor de agua en los pilares cae por debajo de 0,8. (Spears, 1983) decía que el curado continuado por debajo del 80% de humedad relativa no conlleva incremento en la hidratación del cemento la cual es necesaria para mejorar la calidad del hormigón.

En la práctica, en el hormigón en obra sometido a los ciclos de humedad diarios con las variaciones estacionales, un curado activo puede interrumpirse antes de que el cemento se haya hidratado completamente. Los datos existentes en la literatura relativos a los efectos de la humedad relativa del curado y las propiedades de la microestructura del cemento son escasos (Patel et al., 1988).

Desde el punto de vista de la durabilidad, el curado es esencial para mejorar la calidad del hormigón superficial, bloqueando el acceso de sustancias agresivas al interior del hormigón (Neville, 1999).

Una alta humedad relativa también tiene su impacto en las propiedades del hormigón. El hormigón pierde módulo de elasticidad cuando está más saturado con la humedad. El hormigón también pierde resistencia cuando se vuelve menos quebradizo. Los hormigones, especialmente los de menores edades pueden perder de forma permanente su capacidad de endurecerse si son expuestos a bajos grados de saturación. Situaciones de alta humedad como cuando llueve seguidas de exposición a altas temperaturas y baja humedad relativa puede hacer fisurarse el hormigón; fisuras que serán mayores cuanto más se repita el ciclo.

### **3. Metodología de la investigación**

La metodología seguida para el estudio y análisis de los datos de laboratorio referentes a las propiedades físico – mecánicas del hormigón ha sido la siguiente:

- Descripción de los ensayos y de los datos que se han utilizado en el estudio, para pasar después a describir el filtrado que se ha hecho de los mismos.
- Descripción de las variables a estudiar, así como la fuente de la que se han obtenido dichos datos y como se combinan estos datos con los datos del laboratorio.
- Descripción del estudio estadístico realizado, discriminando el mismo en las distintas épocas verano – invierno que se han considerado. A partir de ahí se describe la metodología utilizada para realizar el análisis de la varianza en las distintas variantes propuestas en el estudio.
- Conclusiones correspondientes a los comportamientos y tendencias observadas, en el sentido de las potenciales aplicaciones a nivel industrial

que son viables de implementación, con el objeto de optimizar la dosificación de cemento en el hormigón en condiciones de verano y como punto de partida principal para desarrollar una propuesta metodológica de optimización.

### ***3.1. Obtención de datos***

Para la realización del presente estudio se han utilizado los datos de los listados internos de ensayos de probetas cilíndricas de 15x30 cm fabricadas, curadas y ensayadas según normas UNE 83301:1991, 83303:1984 y 83304:1984, realizadas en el Laboratorio LCC CALIDAD Y CONTROL AMBIENTAL, S.A.(en adelante LCC) dentro de la Comunidad de Madrid desde 2001 hasta 2010, ambos incluidos.

### ***3.2. Descripción de los ensayos***

Los ensayos se realizan siguiendo una serie de actividades normalizadas que detallamos a continuación:

- Toma de muestras de hormigón fresco, según UNE 83300:1984
- Determinación de la consistencia mediante el asiento en el cono de Abrams, según UNE 83313:90
- Fabricación de probetas cilíndricas de 15x30 cm, según UNE 83301:91
- Conservación de las probetas en obra, según UNE 83301:91
- Transporte al laboratorio y desmoldeo de las probetas, según UNE 83301:91
- Curado en cámara húmeda, según UNE 83301:91
- Refrentado de probetas con mortero de azufre, según UNE 83303:84
- Rotura por compresión, según UNE 83304:84

### ***3.3. Estudio estadístico***

En este apartado se describen todas las actividades que se han llevado a cabo para realizar el estudio estadístico de los datos obtenidos del programa de gestión de LCC en formato EXCEL para los años 2001-2010.

En primer lugar se describen las variables objeto del estudio y el proceso de filtrado de datos que se ha seguido, cuales han sido los criterios seguidos y la justificación de los mismos.

En segundo lugar se describen las variables a tener en cuenta en el primer estudio realizado, el porqué de las mismas y la obtención de los datos para el estudio.

Posteriormente se describe cual ha sido el proceso para la preparación de las hojas de cálculo, los criterios seguidos para realizar los filtros y la preparación de datos para su posterior exportación al programa SPSS v.21.

Por último se describe todo el proceso que se ha llevado a cabo para la realización del estudio estadístico en las dos fases en las que se ha dividido el trabajo.

### ***3.4. Variables objeto del estudio estadístico***

Las propiedades mecánicas del hormigón se ven afectadas por las variaciones de temperatura y humedad, dando como resultado minoraciones de resistencias en época estival. En la medida en la que la bibliografía encontrada hace referencia a estudios realizados en laboratorio, con muestras patrón y muestras sometidas a diferentes condiciones de curado, el objetivo del presente trabajo es analizar todos los datos disponibles, que son reales obtenidos de miles de tomas en obra, para contrastar los resultados obtenidos en otros trabajos en laboratorio con los datos obtenidos del programa de gestión de LCC durante un decenio. Por lo tanto, nuestras variables de este primer estudio van a ser la temperatura ambiental (máxima diaria), la humedad relativa del aire (media diaria) y la presión barométrica (media diaria). Una vez obtenidos los ficheros en formato EXCEL con todos los datos de las muestras y los resultados de los ensayos se procede al filtrado de los mismos con el fin de que sean compatibles y coherentes con los datos de las variables en estudio.

### ***3.5. Obtención de datos climáticos***

Los datos aportados por el programa de gestión interna de LCC corresponden a obras repartidas por toda la Comunidad de Madrid, por lo que la primera medida a tomar es la distribución de obras por zonas para que los datos obtenidos en cada una de ellas se correspondan con los datos climáticos. Para ello se opta por adoptar la distribución geográfica que hace la Consejería de Medio Ambiente de la Comunidad de Madrid a la hora de agrupar los datos climáticos disponibles en su base de datos.

En la página web de la Consejería de Medio Ambiente de la Comunidad de Madrid, [madrid.org](http://madrid.org), en el área de descargas, se obtienen los siguientes datos diarios, exportables en formato EXCEL, correspondientes a cada una de las cuatro zonas.

### 3.6. Filtrado de datos y preparación de hojas de cálculo

A la hora de trabajar con los datos obtenidos del programa de gestión de LCC, para estudiar cómo afectan una serie de variables externas a las propiedades del hormigón, tenemos que filtrar los datos de forma que los parámetros con los que trabajemos sean coherentes y homogéneos. En primer lugar se procede a filtrar los datos por tipo de hormigón, ya que resulta imprescindible que todos los hormigones tengan la misma resistencia característica a la hora de comparar los resultados de las roturas de probetas. El mayor número de muestras corresponde a un hormigón HA-25/B 20/ IIa, por lo que el estudio estadístico se realizará sobre estas muestras.

Año/ fck	TIPO DE HORMIGÓN SEGÚN Fck (%)							
	125	200	250	20	25	30	35	40
2001		7	20		60	7	6	
2002	6			1	68	16	9	
2003	1			1	74	18	6	
2004				6	69	14	9	2
2005					78	12	8	2
2006	1			3	53	26	15	2
2007	5			4	63	16	10	2
2008	3			1	51	30	12	1
2009	2			1	44	33	13	1
2010					57	32	10	1

Tabla 3.1. Tipos de hormigón según  $f_{ck}$  periodo 2001-2010

A continuación se ha procedido a filtrar los datos por zona geográfica, de forma que se ajusten a la distribución que realiza la Consejería de Medio Ambiente de la Comunidad de Madrid y podamos analizar esos datos con los datos de las variables climáticas de esa zona. La mayor cantidad de datos disponibles corresponde a la denominada “Zona Sur” de la Comunidad de Madrid, por lo que el estudio estadístico se centrará en los datos de dicha zona.

A partir de este punto vamos a trabajar únicamente con los datos correspondientes a la “Zona Sur” de la Comunidad de Madrid, con hormigones HA-25/B 20/IIa. Para poder estudiar la influencia de los datos climáticos (durante la permanencia de las probetas en obra), se realiza un nuevo filtro por fechas, de forma que obtenemos la resistencia media diaria para el período 2001-2010. Esos datos se cruzan con los datos climáticos obtenidos en la web de la Consejería de Medio Ambiente de la Comunidad de Madrid, creando la siguiente tabla (se muestran solamente algunos datos a modo de ejemplo):

<i>FECHA</i>	<i>TEMPERATURA</i>	<i>HUMEDAD</i>	<i>PRESION</i>	<i>RESISTENCIA</i>
15/03/2001	13,40	46,00	919,00	276,84
23/03/2001	18,10	39,00	916,00	283,68
02/04/2002	13,70	43,00	920,00	361,80

Tabla 3.2.Datos climáticos y resistencias a compresión medias diarias

Como el análisis estadístico que se va a realizar consiste en diferentes ANOVAs, tenemos que establecer los rangos en que vamos a segregar los datos de cada una de las variables independientes. Como los estudios que se van a realizar van a ser “Año completo”, “solo invierno” y “solo verano”, dichos rangos variarán de uno a otro caso para poder disponer de datos en todos ellos. En unos casos los diferentes niveles se obtienen a partir de la media +/- la desviación estándar y en otros casos a partir de la media +/- la mitad de la desviación estándar.

Los rangos que se establecen son los siguientes:

-Año completo:

	<b>T(°C)</b>	<b>H(%)</b>	<b>P(mb)</b>
Media	15,67	55,85	928,68
Desv.estandard	8,03	20,81	6,32
Media+D.E	23,70	76,66	935,00
Media-D.E	7,63	35,04	922,35

#### **TEMPERATURA**

Rango	Minimo	Nivel
<7,63	-5	1
7,64-15,67	7,64	2
15,68-23,70	15,68	3
>23,71	23,71	4

#### **HUMEDAD**

Rango	Minimo	Nivel
<35,04	0	1
35,05-55,85	35,05	2
55,86-76,66	55,86	3
>76,66	76,66	4

**PRESION**

Rango	Minimo	Nivel
<922,35	0	1
922,36-928,68	922,36	2
928,69-935	928,69	3
>935	935	4

Tabla 3.3. Rangos de datos climáticos para años completos

-Solo verano:

	T(°C)	H(%)	P(mb)
Media	22,28	42,44	928,08
Desv.estandard	5,20	15,65	4,21
Media+D.E	27,48	58,09	932,28
Media-D.E	17,08	26,79	923,87
media+DE/2	24,88	50,26	930,18
media-DE/2	19,67	34,61	925,97

**TEMPERATURA**

Rango	Minimo	Nivel
<19,67	-5	1
19,67-22,28	19,67	2
22,28-24,88	22,28	3
>24,88	24,88	4

**HUMEDAD**

Rango	Minimo	Nivel
<34,61	0	1
34,61-42,43	34,6	2
42,43-	42,43	3
>50,25	50,25	4

**PRESION**

Rango	Minimo	Nivel
<927,97	0	1
925,97-928,07	925,97	2
928,07-930,17	928,07	3
>930,17	930,17	4

Tabla 3.4. Rangos de datos climáticos para el periodo de verano

-Solo invierno:

	<b>T(°C)</b>	<b>H(%)</b>	<b>P(mb)</b>
Media	9,31	68,24	929,37
Desv.estandard	3,86	16,34	7,73
Media+D.E	13,17	84,58	937,09
Media-D.E	5,44	51,90	921,64
media+DE/2	11,23	76,41	933,23
media-DE/2	7,37	60,07	925,50

#### TEMPERATURA

Rango	Minimo	Nivel
<5,44	-5	1
<5,44-9,31	5,44	2
9,31-13,17	9,31	3
>13,17	13,17	4

#### HUMEDAD

Rango	Minimo	Nivel
<51,9	0	1
51,9-68,24	51,9	2
68,24-84,18	68,24	3
>84,18	84,18	4

#### PRESION

Rango	Minimo	Nivel
<921,64	0	1
921,64-929,37	921,64	2
929,37-937,09	929,37	3
>937,09	937,09	4

Tabla 3.5. Rangos de datos climáticos para el periodo invierno

Se pretende estudiar también la posible influencia de la producción anual de cemento en España en la calidad del mismo (entiéndanse por tal factores tan importantes como la finura de molido), por lo que se procede a establecer los siguientes rangos:



<b>PRODUCCIÓN DE CEMENTO (miles de Tn)</b>	
2010	26.166
2009	29.503
2008	42.082
2007	54.721
2006	54.032
2005	50.387
2004	46.593
2003	44.756
2002	43.388
2001	40.530

Media	43.215,8
Desv.estandard	9.438,86
media+DE/2	47.935,23
media-DE/2	38.496,37

**Producción de cemento**

Rango	Minimo	Nivel
<38496,37	0	1
38496,37-43215,8	38.496,37	2
43215,8-43215,8	43.215,8	3
>47935,23	47.935,23	4

Tabla 3.6. Producción anual de cemento en España 2001-2010 y rangos establecidos

Una vez tenemos segregados todos los datos de las variables independientes en sus diferentes niveles, se procede a construir una nueva tabla, a partir de la que genera el programa de gestión, en la que se añaden las siguientes columnas y se exportan a SPSS (se muestran solamente algunos datos a modo de ejemplo):

FECHA	TEMPERATURA	HUMEDAD	PRESION	RESISTENCIA	T	H	P	AÑO
15/03/2001	19,1	31	929	302,22	1	1	3	1
23/03/2001	9,5	40	923	272,05	1	2	1	1
02/04/2002	10,9	41	924	297,46	1	2	1	4

Tabla 3.7. Ejemplo de tabla de datos para el estudio

### 3.7. Análisis estadístico verano / invierno

Como se ha visto anteriormente, es bien conocido el efecto de las condiciones ambientales en las propiedades físico – mecánicas del hormigón endurecido, provocando, entre otras cosas, bajadas de resistencias en períodos estivales.

En la siguiente gráfica podemos observar como se confirma la influencia del mes de fabricación (y, por tanto, de la temperatura ambiental) en la resistencia del hormigón con los datos utilizados para la realización del presente trabajo.

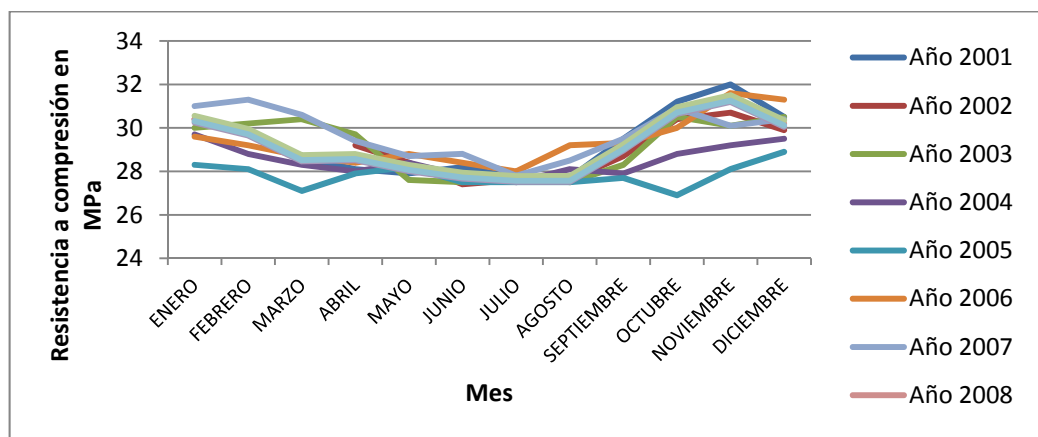


Figura 3.1. Resistencia a compresión en MPa según el mes de fabricación para un HA-25/B-20/IIa

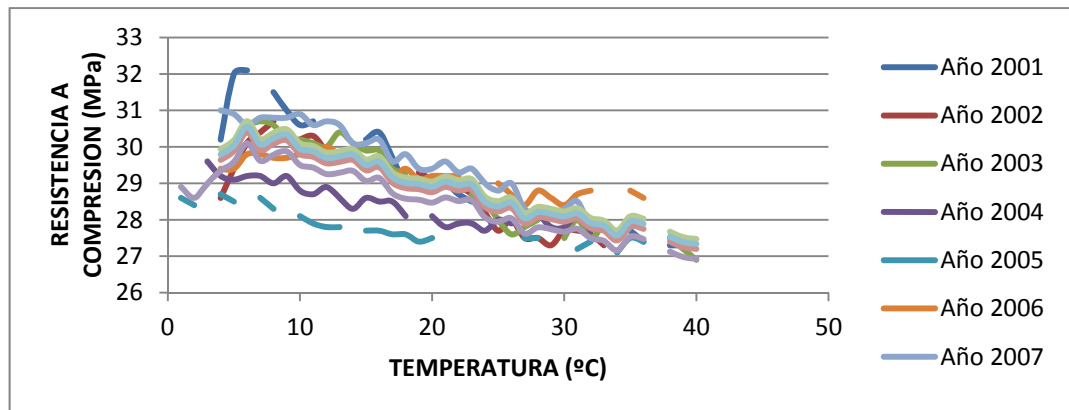


Figura 3.2. Resistencia compresión en función de la temperatura ambiente

Observando los valores medios todo parece indicar que existen diferencias en los valores de la resistencia a compresión al variar la temperatura. Lo mismo sucede en el

caso de la humedad relativa del aire. Ahora bien, ¿son dichas diferencias significativas? Para poder asegurarlo recurrimos al análisis de la varianza.

La técnica del análisis de la varianza se utiliza cuando queremos contrastar más de dos medias, por lo que puede verse como una extensión de la prueba t para diferencias de dos medias. Si el nivel crítico asociado al estadístico F (es decir, si la probabilidad de obtener valores como el obtenido o mayores) es menor que 0,05, rechazaremos la hipótesis de igualdad de medias y concluiremos que no todas las medias poblacionales comparadas son iguales. En caso contrario, no podremos rechazar la hipótesis de igualdad y no podremos afirmar que los grupos comparados difieran en sus promedios poblacionales.

Se muestra a continuación, a modo de ejemplo, una de las tablas obtenidas en la modelización en SPSS.

Origen	Suma de cuadrados tipo III	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	64980,077 <sup>a</sup>	62	1048,066	3,004	,000
Intersección	37280224,574	1	37280224,574	106836,616	,000
T	1253,352	3	417,784	1,197	,310
H	9171,246	3	3057,082	8,761	,000
P	3564,673	3	1188,224	3,405	,017
H * T	6686,861	9	742,985	2,129	,025
P * T	3410,283	9	378,920	1,086	,370
P * H	4466,844	9	496,316	1,422	,173
P * H * T	14116,440	26	542,940	1,556	,037
Error	413152,226	1184	348,946		
Total	110535489,564	1247			
Total corregida	478132,304	1246			

a. R cuadrado = ,136 (R cuadrado corregida = ,091)

Tabla 3.8. Resultado ANOVA verano 3 factores (T,H y P)

#### 4. Resumen de los análisis realizados

Resumimos a continuación en la siguiente tabla los resultados obtenidos, en los que se marcan por colores los periodos en los que las variables independientes tienen influencia significativa en la variable dependiente.

-ANOVAS de un factor:

VARIABLE	PERIODO		
	Año completo	Invierno	Verano
	.sig	.sig	.sig
T	0	0,001	0
H	0	0	0
P	0	0,552	0
A	0	0	0

Tabla 4.1. Tabla resumen de ANOVAS de 1 factor

-ANOVAS de dos factores:

VARIABLE	PERIODO		
	Año completo	Invierno	Verano
	.sig	.sig	.sig
T con TH	0,02	0,108	0,158
H con TH	0	0	0
TH	0,035	0,053	0,128
T con TP	0	0	0
P con TP	0,754	0,587	0,09
TP	0,529	0,361	0,827
T con TA	0	0,007	0,007
A con TA	0	0	0
TA	0	0,159	0,159
H con HP	0	0	0
P con HP	0,297	0,662	0,662
HP	0,293	0,707	0,707
H con HA	0	0	0
A con HA	0	0	0
HA	0	0,258	0,65
P con PA	0	0,267	0,005
A con PA	0	0	0
PA	0,009	0,36	0,056

Tabla 4.2. Tabla resumen de ANOVAS de 2 factores

ANOVAS de tres factores:

VARIABLE	PERIODO		
	Año completo	Invierno	Verano
	.sig	.sig	.sig
<b>T con THP</b>	0,011	0,043	0,31
<b>H con THP</b>	0	0,004	0
<b>P con THP</b>	0,575	0,228	0,017
<b>TH con THP</b>	0,052	0,02	0,025
<b>TP con THP</b>	0,298	0,887	0,37
<b>HP con THP</b>	0,264	0,069	0,173
<b>THP</b>	0,519	0,002	0,037
<b>T con THA</b>	0,048	0,284	0,135
<b>H con THA</b>	0	0	0,005
<b>A con THA</b>	0	0	0
<b>TH con THA</b>	0,054	0,149	0,306
<b>TA con THA</b>	0,016	0,281	0,33
<b>HA con THA</b>	0,661	0,209	0,815
<b>THA</b>	0,251	0,393	0,629
<b>H con HAP</b>	0	0	0
<b>A con HAP</b>	0	0	0
<b>P con HAP</b>	0,056	0,088	0,187
<b>HA con HAP</b>	0,006	0,086	0,513
<b>HP con HAP</b>	0,038	0,513	0,546
<b>AP con HAP</b>	0,471	0,222	0,042
<b>HAP</b>	0,625	0,28	0,181
<b>A con APT</b>	0	0	0
<b>P con ATP</b>	0,729	0,303	0,123
<b>T con ATP</b>	0	0,006	0
<b>AP con ATP</b>	0,712	0,406	0,195
<b>AT con ATP</b>	0	0,208	0,07
<b>PT con APT</b>	0,232	0,752	0,493
<b>APT</b>	0,782	0,759	0,247

Tabla 4.3. Tabla resumen de ANOVAS de 3 factores

<b>VARIABLE</b>	<b>SIGNIFICADO</b>
<b>T</b>	Temperatura
<b>H</b>	Humedad relativa
<b>P</b>	Presión barométrica
<b>A</b>	Año de producción

Tabla 4.4. Leyenda de variables estudiadas

<b>Influencia significativa</b>	<b>Color</b>	<b>Número de casos</b>
solo año completo	Yellow	10
solo invierno	Red	0
solo verano	Brown	3
año completo + invierno	Green	1
año completo + verano	Blue	2
Invierno + verano	Dark Blue	2
Influye en los 3	Purple	18
No influye en ninguno	Light Green	14

Tabla 4.5. Leyenda de las tablas resumen de ANOVAS

Como puede verse en la tabla, las variables Temperatura, Humedad y Año son las que más influencia significativa tienen, bien sea actuando de forma independiente o bien actuando conjuntamente con otras variables, en los diferentes periodos en estudio.

Como es bien conocido, la temperatura y la humedad se comportan de forma inversamente proporcional, siendo el caso de temperaturas elevadas y humedades relativas muy bajas las peores condiciones para el desarrollo de las capacidades mecánicas del hormigón. Para el caso del clima del área de Madrid, cualquiera de las dos variables son parámetros de igual fiabilidad para el control de las variaciones climáticas, pero el problema es que no son parámetros complementarios.

A igualdad de fiabilidad, debemos buscar cual de los dos parámetros es más sensible, especialmente en los días de verano en los que ha habido precipitaciones, por ser estos días en los que la lluvia sobre los acopios de áridos nos puede influir en las resistencias obtenidas. En las gráficas diarias para el clima de Madrid se observa que los días de verano en los que ha habido precipitaciones, la temperatura es más sensible que la humedad.

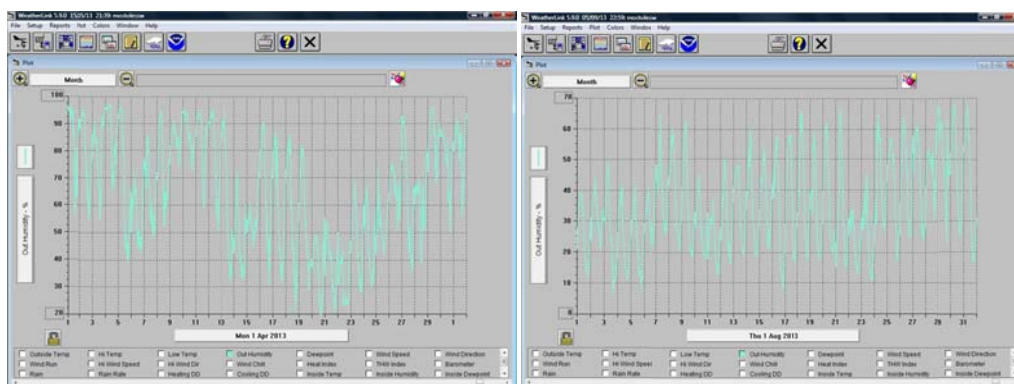


Figura 4.1. Gráficos humedad relativa del aire abril 2013 y agosto 2013. Fuente: Meteomóstoles

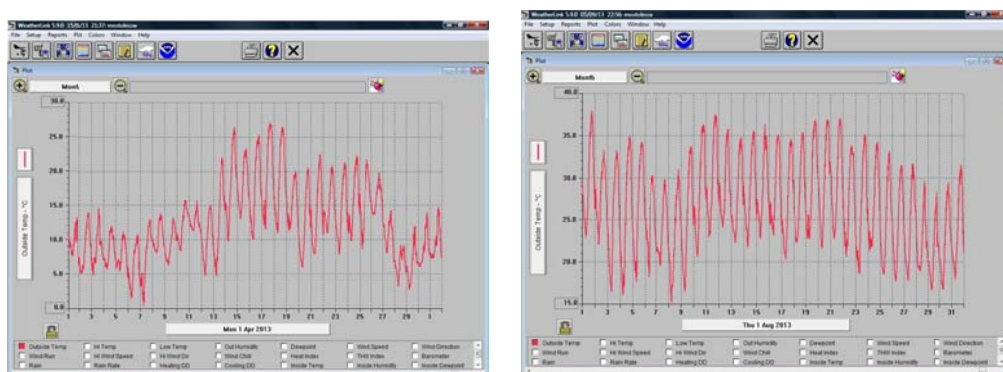


Figura 4.2. Gráficos temperatura ambiente abril 2013 y agosto 2013. Fuente: Meteomóstoles

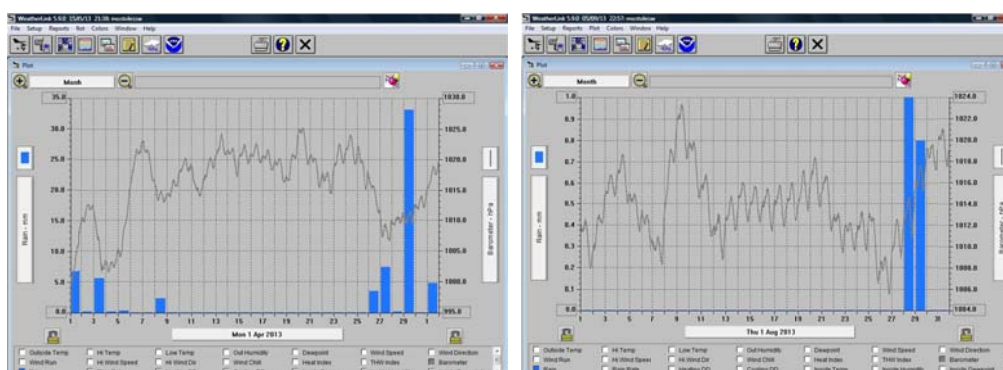


Figura 4.3. Gráficos presión barométrica y precipitaciones abril 2013 y agosto 2013. Fuente: Meteomóstoles

Por otro lado, la variable independiente que tiene influencia significativa en el menor número de casos es la presión atmosférica. Esta variable tiene una gran

importancia en las variaciones diarias por ser la generadora de los vientos, que a su vez producen cambios en las otras variables. No obstante lo anterior, la correlación entre la presión y la temperatura es bastante buena en periodos largos, pero no lo es en periodos muy cortos de tiempo, por lo que en los días veraniegos con lluvia no va a tener la sensibilidad suficiente como para tenerlo en cuenta. No podemos, por lo tanto, considerar la presión atmosférica como parámetro complementario o alternativo a la temperatura ambiental.

En cuanto a la variable Año, es una variable que ha demostrado tener una influencia significativa en muchos de los casos en estudio, obteniéndose mejores resultados de resistencia en los años de menor producción anual de cemento. El problema es que es una variable que no puede ser controlada por el fabricante de hormigón preparado por no depender de él. Es una variable que deberá tenerse en cuenta en función de:

Proveedores de cemento de la planta: homogeneidad del producto, medida en base a la variabilidad de datos como la finura del cemento y la temperatura a la que se suministra.

Las previsiones de producción anuales, las cuales a su vez dependerán de la evolución del sector de la construcción en España.

En base a estos parámetros se debería analizar en cada caso si procede hacer correcciones en la dosificación.

## **5. Conclusiones**

De los estudios estadísticos realizados sobre las bases de datos disponibles de resultados de roturas de probetas a compresión en el periodo 2000-2010 y de los datos obtenidos en la campaña experimental realizada, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Se demuestra estadísticamente la influencia significativa de dos variables climáticas, como son la temperatura y la humedad relativa en la evolución de las resistencias del hormigón a lo largo del año. Se constata la bajada de resistencias en periodo estival, con altas temperaturas y humedades relativas muy bajas.
- De las variables ambientales analizadas en el estudio estadístico realizado en diferentes épocas del año, podemos descartar la presión barométrica como parámetro de control por ser la que menor influencia tiene en todos los casos analizados.
- En cuanto a las variables temperatura y humedad relativa, se demuestra que ambas afectan significativamente a la variable resistencia. La primera es



más sensible que la segunda, por lo que en caso de utilizar solamente una variable como parámetro de control esta debería ser la temperatura.

- La producción anual de cemento en España es una variable que ha demostrado tener una influencia significativa en muchos de los casos en estudio, obteniéndose mejores resultados de resistencia en los años de menor producción anual de cemento. En base a estos parámetros se debería analizar en cada caso si procede hacer correcciones en la dosificación.

## 6. Bibliografía

- Calavera, J. Fernández, J., González, G y Ley, J. (2005), “Estudio experimental sobre la influencia de distintos procedimientos de curado inicial en obra, en la resistencia a compresión de probetas de hormigón”, Nota de información técnica INTEMAC 1-05
- Calavera Ruiz, J., “Probetas tomadas a la salida de la hormigonera”. Revista Informes de la construcción nº 275 I. Eduardo Torroja c.c.- 1975.
- D’Aloia, L. 2003. “Early Age Kinetics: Activation Energy, Maturity and Equivalent Age,” Early Age
- Fernández Cánovas, Manuel (1991), “Influencia de la temperatura de curado sobre la evolución de las resistencias a compresión de hormigones fabricados con distintos tipos de cementos”, Materiales de construcción, vol. 41, nº 222, pp.37-46
- Lange, D.A., and S.A. Altoubat. 2003. “Early Thermal Changes,” Early Age Cracking in Cementitious
- López de la Fuente, J. y Palomo, A. (2004), “Comportamiento Mecánico-resistente del Hormigón Preparado en Períodos Estivales”, Cemento-Hormigón No. 867, pp. 4-13.
- Mehta, K. y Monteiro P. (1998). “Concreto, estructura, propiedades y materiales”. 1ª edición IMCYC, México.
- Morabito, P. (1998), “Methods to Determine the Heat of Hydration of Concrete”, RILEM Report 15, Prevention of Thermal Cracking at Early Ages, Ed. R. Springenschmid, New York.
- Neville, A.M. (1999), “Properties of Concrete (fourth edition)”, Pearson Education Limited, London.
- Neville, A.M. (1995). Properties of Concrete, 4th ed, Longman Group, London, England.
- Ortega Barrionuevo, F., Fernández Cánovas, M. (2009), “Análisis de las causas que motivan la disminución de resistencias a compresión, por efecto de temperaturas elevadas, en probetas de hormigón conservadas en obras durante el control de recepción”, Cemento-Hormigón No 934, pp. 14-25.
- Ortiz Lozano, J. (2005), “Estudio experimental sobre la influencia de la temperatura ambiental en la resistencia del hormigón preparado”, Tesis doctoral, Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona, Universidad Politécnica de Cataluña, España.

- Palomo, A., Blanco-Varela, M.T., Vázquez, T., Puertas, F. y Puig, J. (2000), “Modificaciones Microestructurales del Cemento Hidratado por curado del Hormigón en Períodos Estivales”, *Cemento-Hormigón* No. 814, pp. 1004-1018.
- Paillère, 1995, Application of admixtures in concrete [Número 10 de RILEM report](#). Taylor & Francis. ISBN 0419199608, 9780419199601
- Powers, T. (1947). “A Discussion of Cement Hydration in Relation to the Curing of Concrete”. Research and Development Laboratories of the Portland Cement Association, Bulletin 25, Washington.
- Schindler, A.K. 2002. “Concrete Hydration, Temperature Development and Setting at Early Ages”, PhD dissertation, University of Texas at Austin.
- Schindler, A.K. 2004, “Effect of temperature on hydration of cementitious materials.” *ACI Materials Journal*, Vol. 101: 72- 81.
- Springenschmid, R. (ed.) 1998. *Prevention of Thermal Cracking in Concrete at Early Ages – State-of-the-Art Report prepared by RILEM Technical Committee 119*. London: E and FN Spon.