

INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA AMBIENTAL SOBRE LAS PROPIEDADES DE TRABAJABILIDAD Y MICROESTRUCTURALES DE MORTEROS Y PASTAS DE CEMENTO

J.A. Ortiz^a, A. Aguado^b, J. Roncero^c, M.E. Zermeño^a

RESUMEN

En este artículo se presentan procedimientos, resultados y conclusiones sobre un estudio experimental cuyo objetivo es determinar la influencia de las condiciones ambientales en las propiedades de trabajabilidad y microestructurales de morteros y pastas de cemento. Se utilizaron tres condiciones climáticas: referencia, condiciones de verano y condiciones de invierno, en relación a temperatura ambiental y humedad relativa. Se determinó la influencia de la temperatura ambiental en algunas propiedades físicas de los agregados finos y se analizó su efecto sobre la trabajabilidad de morteros. Asimismo, se estudió la influencia de la temperatura ambiental sobre las propiedades de la pasta de cemento fresca considerando las dosis de aditivo y sobre las propiedades microestructurales de pastas de cemento mediante Resonancia Magnética Nuclear (RMN) y SEM. Los resultados obtenidos indican que la trabajabilidad del mortero depende de las propiedades de los agregados, las cuales son influenciadas por la temperatura. Los estudios de microestructura indican que las condiciones climáticas extremas influyen en el desarrollo microestructural de pastas de cemento, especialmente en las edades más tempranas. En función de los resultados obtenidos se propuso una formulación metodológica para optimizar las dosificaciones de cemento en el concreto, obteniendo resultados satisfactorios en relación a ahorros de cemento en períodos estivales, con sus respectivos beneficios económicos y medioambientales.

Palabras clave: temperatura, pasta de cemento, aditivo, mortero, trabajabilidad, agregado, absorción, microestructura, RMN, SEM.

ABSTRACT

This work presents procedures, results and main conclusions derived from an experimental study aimed at determining the effects of environmental temperature on the workability and microstructural properties of mortars and cement pastes. In this study, three climatic conditions were used: reference, hot weather and cold weather, as related to temperature and relative humidity. The influence of environmental temperature in some physical properties of fine aggregates was defined and its final effects over the mortar's workability were analyzed. Also, the influence of environmental temperature over the properties of fresh cement pastes considering the admixture dose and over the microstructural properties of cement pastes using NMR and SEM, were studied. The results show that mortar workability is a function of the properties of aggregates that in turn are influenced by temperature. The microstructural studies indicate that extreme environmental conditions have effects on microstructural development of cement pastes, especially at early ages. Based on the above-mentioned results a methodological procedure was proposed in order to optimize the cement dosage in concrete, obtaining satisfactory results regarding cement savings in summer periods, with their associated economical and environmental benefits.

Keywords: temperature, cement paste, admixture, mortar, workability, aggregate, absorption, microstructure, NMR, SEM.

^a Doctor en Ingeniería, Departamento de Construcción y Estructuras, Universidad Autónoma de Aguascalientes, Av. Universidad 940, edificio 108, C.P. 20100 Aguascalientes, México.

^b Doctor en Ingeniería, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona, Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), C. Jordi Girona 1-3, modulo C-1, C.P. 08034 Barcelona, España.

^c Doctor en Ciencias Químicas, Technology and Development, BU Admixture Systems Europe, BASF Construction Chemicals España, S.A., Basters, 15 – 08184 Palau - Solità i Plegamans, Barcelona, España.

RESUMO

Este artigo apresenta os processos, resultados e as conclusões dum estudo-piloto cujo objetivo é determinar a influência das condições ambientais sobre as propriedades microestruturais e de trabalhabilidade das argamassas e pastas de cimento.

Foram utilizadas três condições climáticas: base, condições de verão e de inverno, em relação à temperatura ambiente e umidade relativa.

Foi determinada a influência da temperatura ambiente sobre algumas propriedades físicas dos agregados finos e foi analisado o seu efeito sobre a trabalhabilidade das argamassas. Também se estudou a influência da temperatura ambiente sobre as propriedades da pasta fresca de cimento - considerando as doses do aditivo - e sobre as propriedades microestruturais de pastas de cimento por RMN e MEV. Os resultados que se obtiveram, indicam que a trabalhabilidade da argamassa depende das propriedades dos agregados, as que são influenciadas pela temperatura. Estudos de microestrutura sugerem que as condições climáticas extremas influem no desenvolvimento microestrutural das pastas de cimento, sobretudo nas idades mais jovens.

Em função dos resultados obtidos, foi sugerida uma concepção metodológica para aperfeiçoar as dosagens do cimento no concreto. Os resultados foram satisfatórios em relação à poupança de cimento durante o verão, com os correspondentes benefícios econômicos e ambientais.

Palavras-chave: temperatura, pasta de cimento, aditivo, argamassa, trabalhabilidade, agregado, absorção, microestrutura, RMN, MEV.

1. INTRODUCCIÓN

Existe una gran variedad de problemas en relación a la producción de concreto premezclado en climas cálidos, los cuales surgen como resultado de una alta temperatura en el propio concreto y también, del incremento en la tasa de evaporación del agua de mezclado. Estos problemas tienen lugar durante las fases de mezclado, colocación y curado del concreto. Una alta temperatura ambiental ocasiona un aumento en la temperatura del concreto fresco debido al incremento en la temperatura de sus propios constituyentes. Asimismo, lo anterior ocasiona también que el concreto tenga una mayor demanda de agua, lo cual tiene como resultado una mayor velocidad de pérdida de revenimiento y una aceleración del proceso de hidratación, lo que reduce los tiempos de fraguado y desde el punto de vista mecánico, reduce la resistencia [1].

Además, debido a que los agregados son el material con mayor proporción en el concreto, tanto en volumen como en masa, un aumento en la temperatura de éstos produce un gran aumento en la temperatura del concreto fresco [2].

Por otro lado, cabe hacer mención que existen algunos métodos para minimizar los efectos adversos de la climatología sobre las propiedades del concreto fabricado en climas cálidos, entre los cuales podemos mencionar los siguientes: reducción del contenido de cemento; sustitución parcial del cemento por puzolana; utilización de cemento de bajo calor de hidratación; control de la finura y forma de las partículas del cemento; mejora de las propiedades de los agregados; control térmico de los agregados (crear sombras en los acopios y rociarlos con agua fría); utilizar agua helada o incorporar hielo triturado en el concreto; enfriar el concreto fresco con nitrógeno líquido, etc. [3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11]. Sin embargo, estas estrategias generalmente encarecen los costos de producción del concreto, y su practicidad también está limitada a la disponibilidad de materias primas e infraestructura, según las condiciones regionales de cada planta de producción de concreto.

Con base en la problemática expuesta anteriormente, se realizó un estudio de tipo experimental, cuyo objetivo general era identificar la influencia que cada componente tiene sobre el efecto final de la temperatura en la trabajabilidad y resistencia a compresión del concreto; asimismo, optimizar el concreto en climas cálidos y al mismo tiempo, proponer algunas medidas de actuación a nivel industrial para minimizar los efectos adversos en plantas de producción de concreto premezclado, interviniendo sobre la dosificación de cemento en el concreto y sobre las propiedades físicas de los agregados [12]. En este sentido, algunos de los resultados mostrados en este artículo han sido ya aplicados en condiciones reales de producción de concreto premezclado, obteniendo resultados satisfactorios en relación a considerables ahorros en el consumo de cemento en períodos estivales, con sus respectivos beneficios medioambientales [13]. El objetivo de este artículo es mostrar los procedimientos metodológicos y los resultados obtenidos de algunas de las fases experimentales de esta investigación. Asimismo, se presenta una discusión y las conclusiones generadas al respecto.

2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

2.1 Variables estudiadas.

Las variables estudiadas correspondientes a las fases experimentales desarrolladas en este proyecto de investigación y mostradas en este artículo son las siguientes:

2.1.1 Estudios con agregados:

- Ensayos de absorción.
- Ensayos de contenido de humedad de arenas.

2.1.2 Estudios de trabajabilidad en morteros (consistencia).

2.1.3 Estudios sobre pastas de cemento con aditivo polifuncional.

2.1.4 Estudios microestructurales de pastas de cemento.

Dichas variables fueron seleccionadas con el objeto de determinar la influencia de diferentes condiciones ambientales sobre el comportamiento de agregados, morteros y pastas de cemento, específicamente en relación a la trabajabilidad y la microestructura.

Las siguientes secciones describen la metodología utilizada para cada estudio.

2.2 Condiciones climáticas y simulación.

Las variables estudiadas estuvieron sujetas a diferentes condiciones climáticas, tales como temperatura y humedad relativa. Estas condiciones climáticas fueron mantenidas constantes, bajo tres tipos de clima: referencia (temperatura de 20° C), verano (temperatura de 38° C) e invierno (temperatura de 6° C); para todos los casos, la humedad relativa fue siempre del 60% constante.

Con el objeto de simular estas condiciones climáticas, se construyó una cámara climática en la cual pudieran ser programadas tanto la temperatura como la humedad relativa en función del tiempo. Antes de realizar cualquier ensayo, todos los materiales (cemento, agregados, aditivos y agua) e instrumental fueron colocados en dicha cámara al menos 72 horas antes de comenzar la prueba o el ensaye.

2.3 Materiales.

Para la realización de las campañas experimentales se utilizó cemento Portland CEM I 42.5 R [Tipo I de acuerdo a la ASTM Standard Specification for Portland Cement (ASTM C150)]; 42.5 significa la resistencia a compresión que alcanza en MPa y “R” que dicha resistencia es alcanzada en 7 días. El aditivo químico empleado corresponde a un aditivo polifuncional en base a sulfonatos surfactantes.

Los agregados finos (arena) eran de origen calizo y triturados, los cuales son normalmente utilizados para la fabricación comercial de concretos y morteros. Las clasificaciones según el tamaño de las partículas de estas arenas son de 0-5 mm y 0-2 mm, con módulos de finura de 3.47 y 2.99, respectivamente.

2.4 Estudios con agregados.

2.4.1 Ensayos de absorción.

En la fabricación de mortero o concreto, la velocidad de absorción afecta directamente a la trabajabilidad, cuando los agregados se encuentran en estado seco. El objetivo de estos ensayos es el de analizar la influencia de la temperatura en la velocidad de absorción de los agregados. Para lo anterior, se determinó el coeficiente de absorción bajo dos tiempos de saturación: 30 minutos y 24 horas, para cada una de las tres condiciones climáticas estudiadas. La metodología empleada es la establecida en la ASTM Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate (ASTM C128).

2.4.1.1 Ensayos de contenido de humedad de arenas.

Es bien sabido que el contenido de humedad de los agregados puede modificar la trabajabilidad y la uniformidad del concreto, y por lo tanto, afectar sus propiedades en estado endurecido [14]. El objetivo de los ensayos de contenido de humedad es el de determinar el comportamiento de los agregados bajo diferentes niveles de contenido de humedad, partiendo desde un estado seco (DS) hasta un estado cuyo contenido de humedad sea equivalente al de saturado con superficie seca (SSD), bajo diferentes condiciones de temperatura.

En los ensayos, el agua fue añadida a los agregados progresivamente y el contenido de humedad era medido en cada intervalo. Para ir dando humedad al material se utilizó un atomizador de agua tipo casero, controlando aproximadamente la cantidad de agua mediante el número de pulsaciones del gatillo. Posteriormente, se determinaba el contenido de humedad de la arena de acuerdo a la ASTM Test Method for Total Evaporable Moisture Content of Aggregate by Drying (C566-97),

utilizando un horno de microondas. El procedimiento continuó hasta que la última lectura de contenido de humedad fuera aproximadamente igual al coeficiente de absorción de la arena.

Los siguientes ensayos, se incluyen como parte de los ensayos de contenido de humedad de los agregados, y su metodología se explica a continuación:

- Penetración de la aguja de Vicat. ($\varphi = 10$ mm, $m = 300$ g).

Este ensayo consiste en medir la capacidad de la arena de ser penetrada por una aguja de Vicat de 10 mm de diámetro y con una masa de 300 gramos. Para esto se utilizó el aparato de Vicat descrito en la norma ASTM Test Method for Normal Consistency of Hydraulic Cement (C187-98).

El procedimiento consistió en llenar el recipiente en dos capas de arena sin ejercer compactación alguna, posteriormente se enrasaba y se colocaba la aguja por encima de la superficie de la arena, es decir, casi al ras de ésta; luego se dejaba caer y se medía la penetración de la aguja desde la parte superior del recipiente: este procedimiento se repetía cuatro veces para cada contenido de humedad. Este ensayo brinda una aproximación de la “trabajabilidad” de la arena en función de su contenido de humedad y temperatura.

- Densidad compactada.

El objetivo de este ensayo es el de conocer el efecto de la temperatura y el contenido de humedad de la arena en el nivel de compactación de la misma bajo vibración dinámica.

El recipiente utilizado era cilíndrico de 5 litros de capacidad volumétrica (diámetro = 188.1 mm y altura = 180.0 mm) sin perforaciones en la parte inferior.

El procedimiento experimental era llenar el molde progresivamente con un cucharón metálico teniendo cuidado de no ejercer compactación alguna sobre el material previamente vertido. Una vez llenado el molde se enrasaba con una regla metálica, también sin ejercer compactación sobre el material y posteriormente se colocaba sobre la mesa de vibración por 15 segundos. Posteriormente al vibrado, se medían los asentamientos en 9 puntos, incluyendo el centro y se obtenía la media de los asentamientos; con estos datos se calculaba la densidad compactada. El término densidad compactada se refiere a la relación entre la masa de arena y el volumen real de arena (sin vacíos).

2.5 Estudios de trabajabilidad en morteros (consistencia).

Con el objeto de determinar la influencia de la humedad y temperatura de la arena en la trabajabilidad del mortero, se fabricaron varios morteros con cemento Portland y arena caliza triturada de tamaño de partículas 0-5 mm. Las proporciones utilizadas son las correspondientes a las especificadas en la “European Standard (EN196-1): Methods for Testing Cement. Determination of strength”, y se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Materiales y dosificación para la fabricación de morteros.	
Material	Dosificación, g
Cemento	450 ± 2
Agua	225 ± 1
Arena 0-5 mm (caliza triturada)	1350 ± 5

La relación agua/cemento se mantuvo constante siempre en 0.5, es decir antes de elaborar cada mortero se determinaba el contenido de humedad real de la arena y se realizaba un ajuste en la cantidad de agua por peso. Por lo anterior siempre se contaba con la misma cantidad de agua, pudiendo estar libremente o contenida en los agregados (superficialmente o parcialmente absorbida por éstos).

Por otro lado, con el objetivo de determinar el efecto de la secuencia de adición de materiales en la trabajabilidad del mortero, la secuencia estandarizada especificada en la norma antes citada fue modificada en este caso. Dicha modificación consistió en agregar parte del agua junto con la arena en el inicio del proceso de mezclado y el resto del agua casi al final del proceso de mezclado, después de haber añadido el cemento. Este método de mezclado fue solamente modificado para el caso de la arena en estado seco (DS); a este método de mezclado se le llamó Método 2. Inmediatamente después de haber mezclado el mortero, se determinó su consistencia en la mesa de sacudidas, de acuerdo a la norma ASTM Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar (ASTM C1437).

El ensayo de consistencia del mortero en estado fresco solamente se realizó para la arena 0-5 mm, debido a que en este ensayo se intentaba determinar el efecto de la secuencia de adición de materiales en la trabajabilidad del mortero, manteniendo constante la relación agua/cemento.

En este sentido, se consideró que la realización de este ensayo con cualquiera de las arenas daría como resultado las mismas tendencias aproximadamente, en relación a la influencia de la secuencia de incorporación de materiales durante el mezclado del mortero.

2.6 Estudios sobre pastas de cemento con aditivo polifuncional.

El principal objetivo de esta serie de ensayos consistió en evaluar la influencia de la temperatura sobre la fluidez, punto de saturación y pérdida de fluidez con el tiempo de la pasta de cemento, así como su influencia sobre la demanda de agua del cemento. La composición de las pastas corresponde a la que tendrá en el concreto suponiendo que los agregados se encuentran en la condición de saturados con superficie seca (SSD).

Los ensayos se realizaron en pastas de cemento con diferentes dosis de aditivo polifuncional (ap/c) a las tres temperaturas estudiadas. La relación agua/cemento de las pastas de cemento es igual a 0.56 y la dosis de aditivo con respecto al peso de cemento (ap/c) corresponde a 0.28% (las relaciones correspondientes a los concretos fabricados en fases experimentales anteriores) [12], expresada como residuo seco del aditivo (considerando el producto tal y como es suministrado esta dosis corresponde a 0.70%). En las pastas de cemento, el agua contenida en el aditivo polifuncional es considerada como parte de la relación agua/cemento y, por tanto, descontada del agua total añadida.

2.6.1 Fabricación de las pastas de cemento.

Las pastas se han preparado en una mezcladora de tipo Hobart de 5 litros de capacidad empleando dos velocidades, una rápida (84 rpm) y otra lenta (60 rpm). La velocidad rápida está limitada por la pérdida de material debido a la alta fluidez de las pastas. La secuencia de mezclado empleada, excepto para la determinación de la demanda de agua, fue la siguiente: el cemento y el 80% del agua (correspondiente a una relación agua/cemento de 0.40) se mezclan durante 1 minuto a velocidad baja. A continuación, se añade el aditivo polifuncional junto con el resto de agua (correspondiente a una relación agua/cemento de 0.10) y se mezclan durante 30 segundos a velocidad baja y 90 segundos más a velocidad alta.

La secuencia de mezclado de las pastas preparadas para determinar la demanda de agua es la indicada en la normativa correspondiente (EN 196-3) con una ligera modificación para considerar las pastas con aditivo polifuncional. La secuencia de mezclado empleada es la siguiente: se mezclan 500 g de cemento, agua y aditivo polifuncional durante 90 segundos, parando 15 segundos para limpiar las paredes de la mezcladora y volviendo a mezclar durante 90 segundos más, todo ello a velocidad baja.

2.6.2 Fluidez, punto de saturación y pérdida de fluidez.

El ensayo del cono de Marsh es un procedimiento rápido y sencillo para evaluar la fluidez de pastas de cemento y para determinar la dosis de saturación de plastificantes y superplastificantes, así como la compatibilidad entre el cemento y el aditivo [15]. También permite evaluar la pérdida de fluidez con el tiempo. Este ensayo es similar al descrito en la norma ASTM C939-87 para la verificación de la fluidez de morteros.

La evolución del tiempo de fluidez del cono de Marsh se determinó cada 15 minutos durante un periodo de 2 horas después del mezclado. El mezclado del material se detenía después de cada medida conservando la pasta dentro de la mezcladora cubierta con plástico y se procedía a mezclar la pasta a velocidad baja 1 minuto antes de cada medida.

2.6.3 Demanda de agua.

La demanda de agua del cemento se considera como la relación agua/cemento necesaria para obtener una pasta de cemento de una determinada consistencia, denominada consistencia normal. Para su determinación se ha seguido el procedimiento descrito en la EN 196-3, en el apartado “Ensayo de Consistencia Normal”. Para ello se emplea el aparato de Vicat equipado con una sonda con un diámetro de 10 mm y se fabrican pastas de cemento con diferente relación agua/cemento. La relación agua/cemento correspondiente a una penetración de la sonda de 34 mm, es decir consistencia normal, es considerada como la demanda de agua.

A cada temperatura, se fabricaron pastas con diferente relación agua/cemento para cada dosis de aditivo químico estudiada hasta obtener una pasta con consistencia normal. Para determinar la demanda de agua en presencia de aditivo se realizó una modificación del procedimiento descrito en la normativa incorporando el aditivo químico junto con el agua de mezclado.

2.7 Estudios microestructurales de pastas de cemento.

En esta sección se describe la metodología seguida para la realización de los ensayos de caracterización microestructural de pastas de cemento, asimismo se muestran y analizan los diferentes resultados obtenidos.

Los ensayos realizados a las pastas de cemento se han hecho con el fin de caracterizar las propiedades microestructurales a diferentes temperaturas, con el objeto de determinar el nivel de formación de CSH, principal producto de hidratación responsable del desarrollo de resistencia en el cemento (mortero, concreto) [16]. Lo anterior, comparando pastas de cemento fabricadas en condiciones extremas con una pasta preparada en condiciones de referencia.

Para el análisis mediante Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) y Resonancia Magnética Nuclear (RMN) de pastas de cemento se tomaron muestras en el momento de desmoldeo a 7 y 28 días, mientras que para el análisis con SEM las muestras se obtuvieron a los 7 y 28 días.

2.7.1 Resonancia Magnética Nuclear (RMN).

La espectroscopia de Resonancia Magnética Nuclear (RMN) de ^{29}Si se emplea para caracterizar el estado de polimerización de los silicatos en la pasta de cemento. En este caso se emplea la técnica MAS (magic angle spinning) específica para materiales sólidos [17]. Los espectros ^{29}Si MAS RMN de las pastas de cemento, se realizaron con un Espectrómetro Bruker AMX-300 MHz de alta resolución con rotores de circonio girando a 3990 Hz, con pulsos de 4 μs y 3 segundos de repetición entre barridos. Como material de referencia se empleó tetrametilsilano (TMS), de manera que los desplazamientos químicos fueron determinados con respecto al mismo.

2.7.2 Microscopía Electrónica de Barrido (SEM).

La Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) es una técnica de caracterización ampliamente empleada para obtener imágenes topográficas de la superficie de un material sólido. En esta técnica, un haz de electrones se acelera hasta obtener una longitud de onda similar a la distancia interatómica y se hace incidir sobre la superficie de la muestra difractándose. Un sistema de detección capta los electrones difractados y los transforma en una imagen monocromática que puede ser fotografiada o digitalizada. La pasta de cemento endurecida es un sistema complejo con un alto grado de heterogeneidad formado por fases sólidas y poros y la técnica SEM permite observar su microestructura, así como la morfología de las diferentes fases anhidras e hidratadas. Para la observación de muestras mediante SEM es necesario exponer la muestra al vacío (aproximadamente 10^{-7} mm Hg). Para la caracterización de las pastas de cemento se ha empleado un microscopio electrónico Hitachi S-2300 con una resolución de 4.5 nm. Se empleó un voltaje de aceleración de 15 kV. Las muestras consisten en pequeños fragmentos (0.2 cm^3 aproximadamente) de pasta de cemento que fueron recubiertas con oro. La observación se hizo sobre superficies de fractura.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Estudios con agregados.

3.1.1 Ensayos de absorción.

La Figura 1, muestra los resultados obtenidos de los coeficientes de absorción para los tiempos de saturación de 30 minutos y 24 horas en función de la temperatura, para ambas arenas.

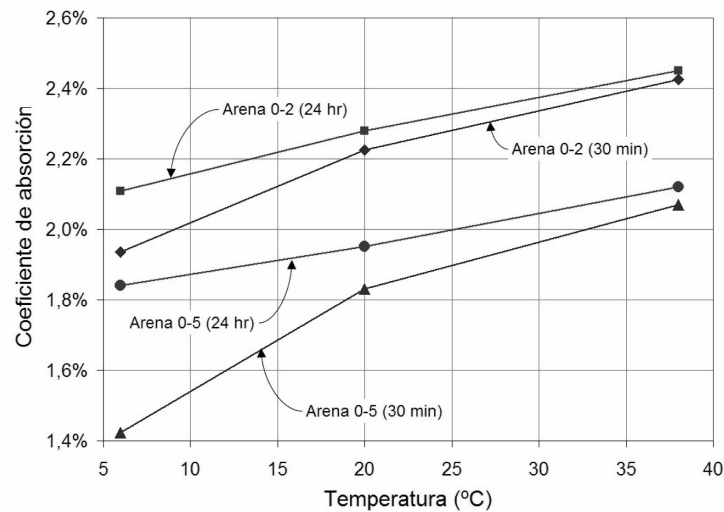


Fig. 1. Coeficientes de absorción para 30 minutos y 24 horas.

La magnitud de los coeficientes de absorción es mayor para la arena fina debido a su mayor superficie específica. En general, los resultados muestran que a mayor temperatura los coeficientes de absorción son también mayores. La diferencia entre los valores de los coeficientes de absorción a tiempos de saturación de 30 minutos y de 24 horas se reducen en función del incremento de la temperatura; de hecho estas diferencias casi son nulas en la máxima temperatura estudiada. Este hecho tiene consecuencias muy significativas en relación a la trabajabilidad en climas cálidos, ya que a temperaturas mayores los agregados absorberán más agua en menos tiempo, debido a una más rápida pérdida de trabajabilidad y a tiempos de fraguado menores. Desde un punto de vista práctico, estos resultados reflejan el ya bien conocido fenómeno de pérdida de trabajabilidad del concreto en períodos estivales, ya que el agua de mezclado es rápidamente absorbida por los agregados durante el proceso de mezclado.

3.1.2 Ensayos de contenido de humedad de arenas.

En las Figuras 2 y 3 se muestra la evolución del contenido de humedad de las arenas 0-5 y 0-2 mm respectivamente, en función del número de pulsaciones del gatillo del atomizador de agua tipo casero utilizado para proporcionar humedad a las arenas.

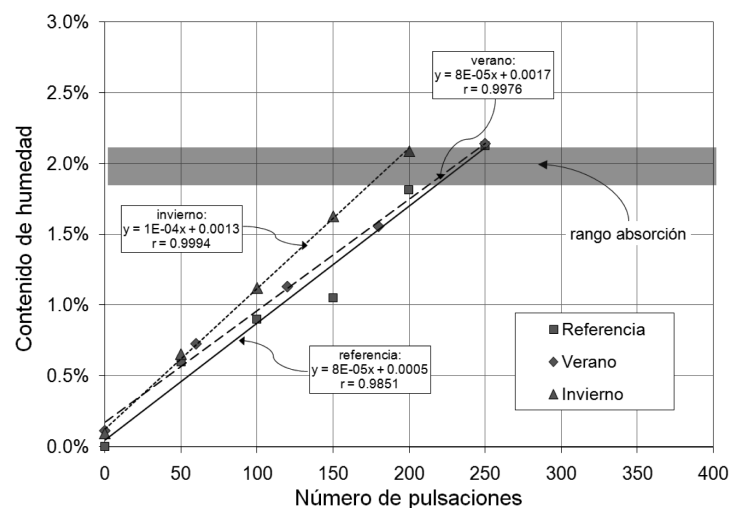


Fig. 2. Evolución del contenido de humedad para la arena 0-5 mm.

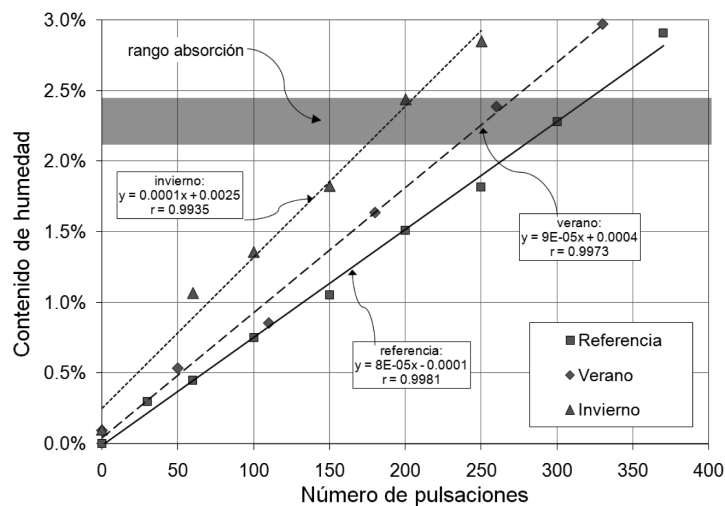


Fig. 3. Evolución del contenido de humedad para la arena 0-2 mm.

3.1.2.1 Penetración de la aguja de Vicat. ($\phi = 10$ mm, $m = 300$ g)

Los resultados correspondientes a la penetración de la aguja de Vicat en las arenas de 0-5 mm y 0-2 mm se presentan en las Figuras 4 y 5, respectivamente. Asimismo, se presenta un análisis de regresión lineal, en el cual se incluyen las ecuaciones de las rectas y los coeficientes de correlación.

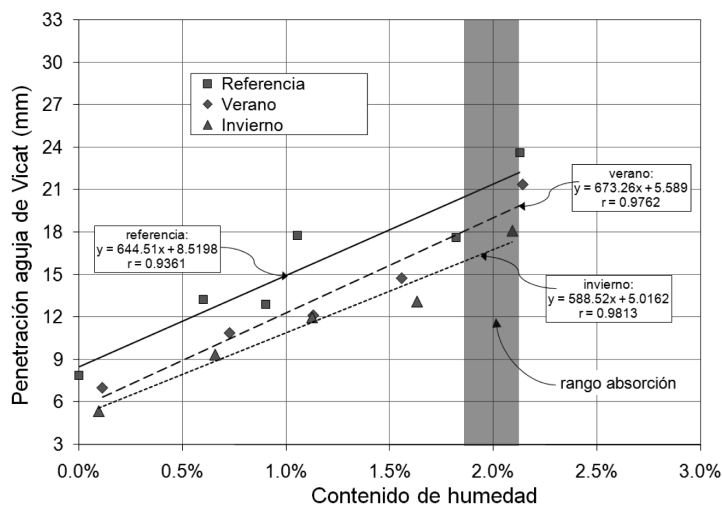


Fig. 4. Penetración de la aguja de Vicat (arena 0-5 mm).

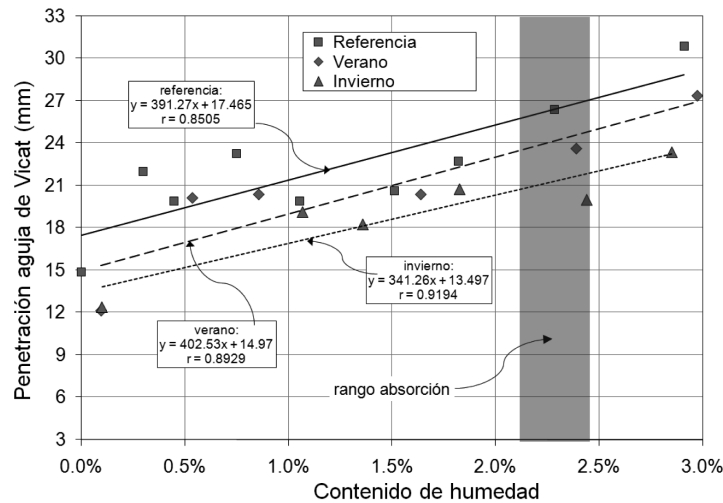


Fig. 5. Penetración de la aguja de Vicat (arena 0-2 mm).

Puede verse que la tendencia de penetración de la sonda en función del contenido de humedad es creciente y lineal, debido al efecto lubricante de la humedad de la arena que hace que la aguja penetre con mayor facilidad. En cuanto a la influencia de la temperatura, puede verse también que las arenas ensayadas bajo condiciones de referencia permiten una penetración mayor, seguidas por las de verano y, por último, por las de invierno. Este comportamiento se debe a cambios en la textura superficial de los agregados, en los cuales se reduce el efecto de “engranaje”, debido al contenido de humedad presente.

3.1.2.2 Densidad compactada.

Los resultados obtenidos en los ensayos de densidad compactada para las arenas de 0-5 mm y 0-2 mm se muestran en las Figuras 6 y 7 respectivamente. Asimismo, se incluye el análisis de regresión lineal en cada caso.

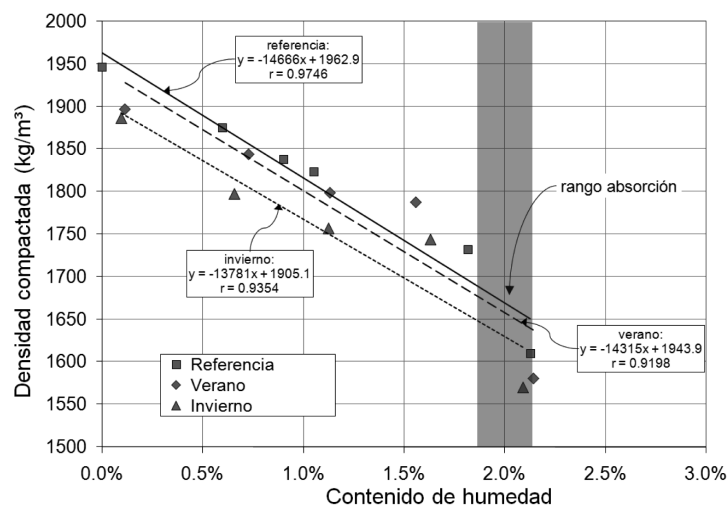


Fig. 6. Densidad compactada (arena 0-5 mm).

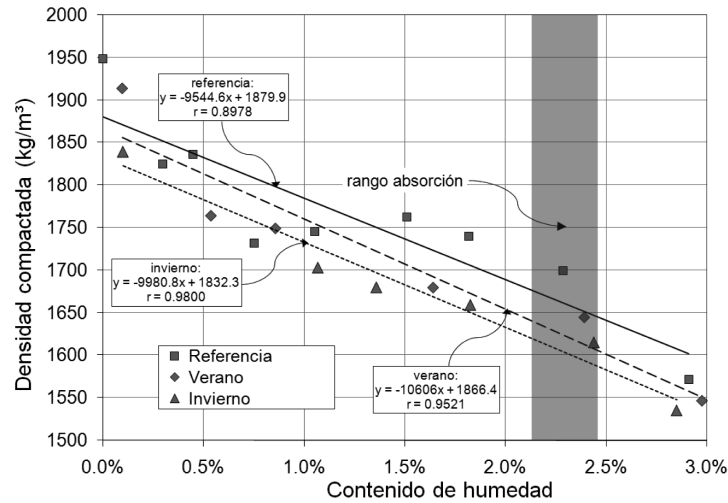


Fig. 7. Densidad compactada (arena 0-2 mm).

Las tendencias mostradas por las arenas en cuanto a la densidad compactada mecánicamente en función del contenido de humedad son, en ambos casos, decrecientes y en relación a la influencia de la temperatura, tienen el mismo comportamiento en general observado en ensayos anteriores.

Por otro lado, el hecho de que la densidad disminuya con el incremento del contenido de humedad puede ser debido a que cuando el agua se adiciona a la arena se produce un efecto local de densificación o agrupación de las partículas granulares, lo cual resulta en una mayor porosidad y por lo tanto en una densidad menor.

Las variables principales en el grado de compactación de la arena son la distribución de tamaño de partículas, la superficie específica, el contenido de humedad, la textura y forma de las partículas y la temperatura, debido a que estos factores reducen la fricción interna entre las partículas y consiguen un mejor acomodamiento de estas bajo vibración.

3.2 Estudios de trabajabilidad en morteros. (Consistencia).

Los resultados obtenidos del ensayo de consistencia de morteros se muestran en la Figura 8. En esta gráfica, se han trazado mediante líneas los puntos correspondientes al diámetro medio del mortero obtenido en la mesa de sacudidas para cada contenido de humedad y para las diferentes condiciones climáticas para el Método 1. Los resultados correspondientes al Método 2 se muestran como puntos y se indican con flechas.

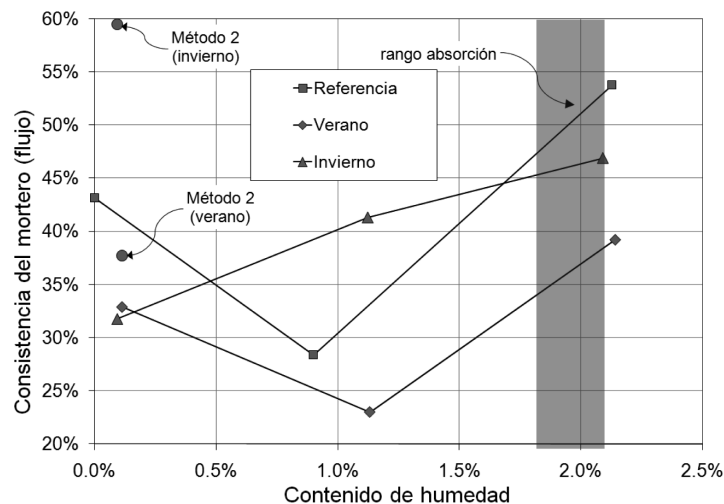


Fig. 8. Consistencia del mortero.

Puede verse que el comportamiento del mortero en condiciones de referencia y verano es similar, ya que las mejores consistencias fueron obtenidas bajo condiciones de humedad equivalentes a la absorción (SSD), pasando a través del estado seco (DS) y los peores resultados, fueron obtenidos con contenidos de humedad intermedios; esta tendencia no es seguida por el mortero de invierno.

El hecho de tener las mejores trabajabilidades cuando el contenido de humedad es mayor que la capacidad de absorción de los agregados puede tener la siguiente explicación. A pesar de que en estado seco (DS), la cantidad de agua de mezclado es mayor, una porción de esta agua es absorbida rápidamente por los agregados, mientras que en estados cercanos al de saturación y superficie seca (SSD), el agua libre no es absorbida y actúa como “lubricante”, ocasionando finalmente una mejor consistencia.

Las peores trabajabilidades en condiciones de verano y referencia son obtenidas en niveles de humedad intermedios debido al hecho de que una porción del agua de mezclado es absorbida por los agregados y la otra parte no es suficiente como para dar una trabajabilidad adecuada.

Es bien sabido que la cantidad de agua requerida para producir una cierta consistencia es siempre mayor con el aumento en la temperatura de los agregados. A altas temperaturas, generalmente la evaporación de cierta cantidad del agua de mezclado se observa durante las fases de colocación del concreto. Además, analizando los resultados obtenidos de consistencia aplicando el Método 2 de mezclado, puede verse una mejora muy efectiva en los niveles de trabajabilidad. La explicación de esta mejoría puede residir en el hecho de que cuando se vierte una porción del agua de amasado a la arena en el proceso de fabricación, las partículas de cemento tienden a dispersarse uniformemente y evitar así, floculaciones masivas de cemento con arena húmeda, además, esto proporciona más agua libre al mortero y se reduce la fricción entre partículas, incrementando así el efecto de lubricación; este efecto también fue observado por Buenfeld y Okundi en [18].

Para el caso de las condiciones de invierno, las mejoras obtenidas aplicando este segundo método de mezclado, se deben al efecto de absorción, debido a que bajo esta situación la absorción es menor y más lenta, por lo que los agregados absorben menos agua libre en comparación a cuando se trabaja bajo condiciones de verano.

Cabe mencionar que en esta investigación se realizaron este tipo de ensayos únicamente con agregados de un solo tipo (calizos triturados), sin embargo sería interesante en términos experimentales realizar estos mismos ensayos con diferentes tipos de agregados, con el objeto de determinar la influencia de las propiedades físicas y microestructurales de los mismos (composición mineralógica, tamaño, forma, textura superficial, graduación, contenido de vacíos, adherencia, empaquetamiento, contenido de humedad, etc.) en las propiedades reológico-mecánicas de morteros y concretos.

3.3 Estudios sobre pastas de cemento con aditivo polifuncional.

3.3.1 Fluidez, punto de saturación y pérdida de fluidez.

La Figura 9 muestra las curvas de fluidez obtenidas en el cono de Marsh a las tres temperaturas estudiadas. La gráfica muestra los resultados obtenidos en pastas de cemento fabricadas con diferentes dosis de aditivo polifuncional abarcando un rango que incluye desde la pasta sin aditivo hasta una dosificación mayor que la empleada normalmente en el concreto. La figura muestra la dosis de aditivo con respecto al peso de cemento como residuo seco y, también, considerando el peso total de aditivo tal y como es suministrado.

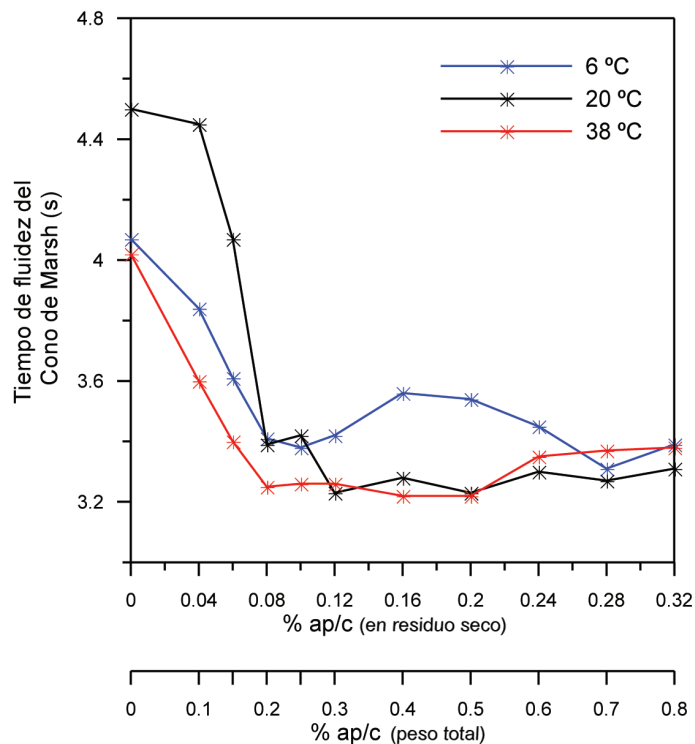


Fig. 9. Fluidez y punto de saturación en función de la temperatura.

El punto de saturación del aditivo polifuncional se define mediante las curvas de fluidez mostradas en la figura anterior como la dosis de aditivo a partir de la cual el tiempo de fluidez del cono de Marsh no varía de forma significativa. Se observa que el punto de saturación obtenido en las pastas de cemento corresponde a una dosis de aditivo de 0.08%, notablemente inferior a la empleada en el concreto (0.28%). Otro aspecto interesante, radica en que el punto de saturación no depende de la temperatura, como muestra dicha figura. Se observa además, que la fluidez inicial de las pastas no está influenciada significativamente por la temperatura, ya que los valores del tiempo de fluidez obtenidos en el cono de Marsh oscilan en un rango bastante limitado. La pérdida de fluidez con el tiempo se determinó para las tres temperaturas estudiadas en pastas de cemento sin aditivo polifuncional y con dosis de aditivo correspondientes al punto de saturación determinado en la sección anterior ($ap/c=0.08\%$) y a la empleada en el concreto ($ap/c=0.28\%$).

La Figura 10 muestra la pérdida de fluidez de todas las pastas de cemento estudiadas durante un periodo de dos horas; las medidas se han realizado en intervalos de 15 minutos.

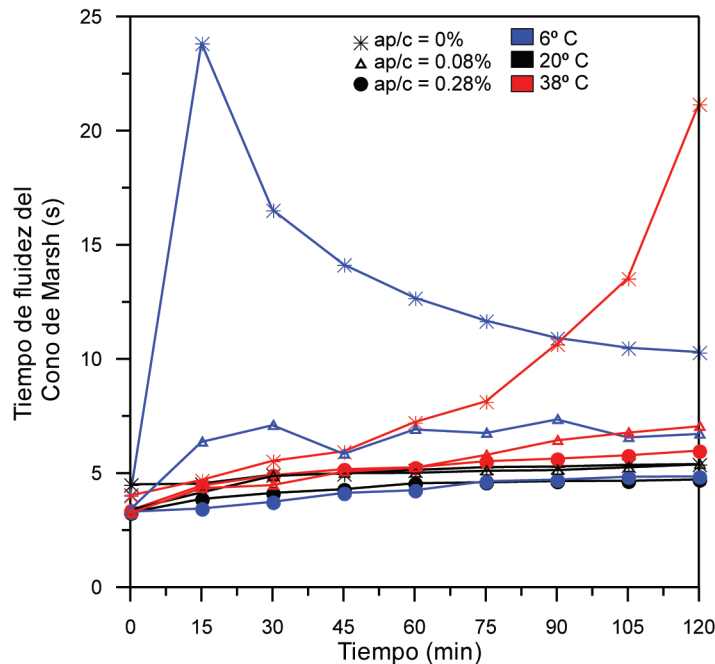


Fig. 10. Efecto de la temperatura en la pérdida de fluidez de pastas de cemento.

Se observa que las pastas con aditivo polifuncional no experimentan una pérdida de fluidez significativa durante un periodo de dos horas independientemente de la dosis empleada.

Sin embargo, la figura muestra comportamientos significativamente diferentes en las pastas sin aditivo, especialmente a 6 y a 38°C. En este sentido, a 38°C se observa una significativa pérdida de fluidez de la pasta que se manifiesta por un paulatino incremento del tiempo de fluidez del cono de Marsh. Por otro lado, a 6°C, la pasta de cemento sin aditivo experimenta una importante disminución de fluidez durante los primeros 15 minutos y, a continuación, una paulatina recuperación de la fluidez con el tiempo.

3.3.2 Demanda de agua.

La Figura 11 muestra la demanda de agua a las tres temperaturas estudiadas, de pastas de cemento sin aditivo y con dosis de aditivo polifuncional correspondientes al punto de saturación en pasta ($ap/c=0.08\%$) y a la empleada en el concreto ($ap/c=0.28\%$).

Los resultados muestran que la temperatura influye de forma significativa en la demanda de agua del cemento, así como la presencia y dosis de aditivo polifuncional. En este sentido, la menor demanda de agua de la pasta de cemento sin aditivo químico se obtiene a 20°C , siendo ligeramente superior a 6°C . Por otro lado, a 38°C , la demanda de agua del cemento es significativamente superior a los valores obtenidos a las otras dos temperaturas.

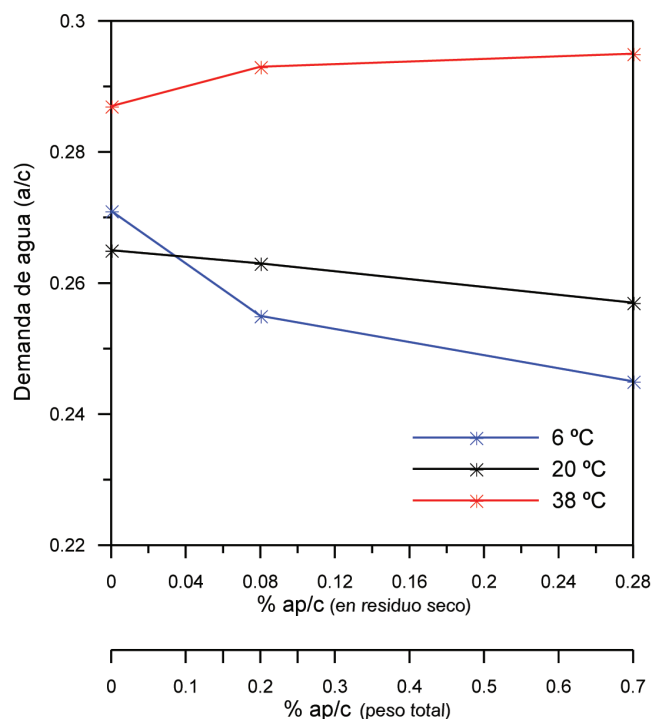


Fig. 11. Demanda de agua en función de la temperatura.

Los resultados en las pastas de cemento con aditivo polifuncional muestran que la demanda de agua aumenta al aumentar la temperatura y, además, este aumento es mucho más significativo al pasar de 20 a 38°C que al aumentar la temperatura desde 6 a 20°C .

Por otro lado, a 6 y 20°C , la incorporación de aditivo polifuncional en las pastas de cemento conduce a una ligera disminución de la demanda de agua; es decir, dichas pastas requieren menor cantidad de agua para alcanzar consistencia normal, como cabe esperar. Sin embargo, a 38°C la incorporación de aditivo químico conduce a un ligero incremento de la demanda de agua para obtener la consistencia normal.

3.4 Estudios microestructurales de pastas de cemento.

Estos ensayos fueron realizados para conocer si los efectos de pérdida de trabajabilidad y resistencia de los morteros o concretos fabricados bajo condiciones de altas temperaturas ambientales son debidos solamente a una mayor absorción por los agregados o a un efecto local que ocasiona la temperatura (en una escala microestructural) en el grado de cristalización o polimerización de los productos de hidratación del cemento y de la interfase pasta-agregado [2].

3.4.1 Resonancia Magnética Nuclear (RMN).

Los espectros de las pastas estudiadas se muestran en la Figura 12. Las concentraciones relativas de las unidades Q^n están directamente relacionadas con el área bajo la curva del pico correspondiente en el espectro.

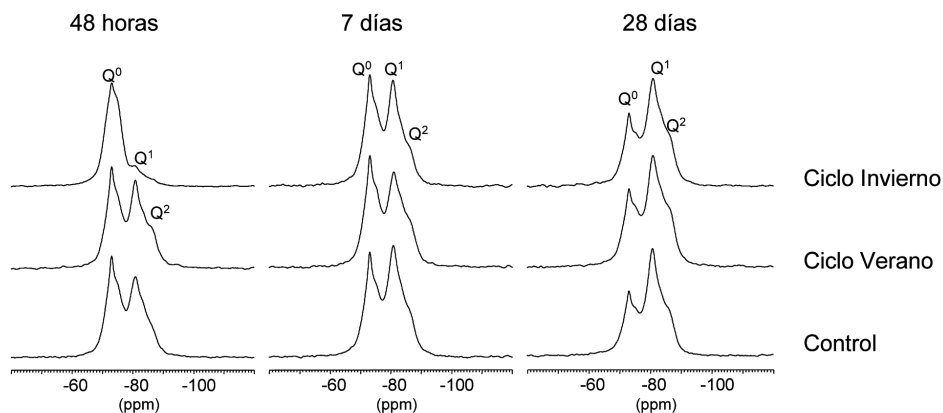


Fig. 12. Espectros²⁹Si MAS RMN de las pastas de cemento.

En la figura anterior, se puede observar que la hidratación y, consecuentemente, la formación de Silicato Cálculo Hidratado (CSH) dependen significativamente del ciclo de temperatura al que ha sido sometida la pasta, especialmente a las edades más tempranas. La técnica de RMN permite la cuantificación de las señales Q^n mediante la integración de los correspondientes picos. En este caso, como los tres picos obtenidos en el espectro se solapan, se puede emplear un método semi-cuantitativo para comparar los espectros de las diferentes pastas. Para ello se determina el área relativa debida a la formación de CSH (área de los picos Q^1 y Q^2) con respecto al área del pico correspondiente a los silicatos anhidros (Q^0), denominada A_{CSH}/A_0 . Los resultados de este proceso de integración se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Área relativa Q^1 y Q^2 respecto al área de Q^0 de las pastas de cemento.

Ciclo	Edad de la pasta		
	48 horas	7 días	28 días
Referencia	0.97	1.38	2.16
Verano	1.06	1.11	2.05
Invierno	0.19	1.06	2.18

Puede observarse en la tabla anterior que a la edad de 48 horas, la cantidad de CSH formado en la pasta sometida a condiciones de invierno es significativamente menor que la que se obtiene en la pasta de referencia y la pasta sometida al ciclo de verano, siendo mayor en este último caso. Sin embargo, en la pasta sometida a condiciones de verano la cantidad de CSH formado se mantiene aproximadamente constante entre 48 horas y 7 días, indicando una inhibición de los procesos de hidratación. Esto no ocurre en la pasta de referencia y la sometida a condiciones de invierno donde la cantidad de CSH aumenta, especialmente en la pasta sometida a condiciones de invierno. A partir de 7 días, las tres pastas evolucionan de forma similar, aunque la pasta sometida a ciclo de invierno muestra una velocidad de formación de CSH mayor que las otras dos pastas estudiadas. Por otro lado, a la edad de 48 horas, el espectro de ²⁹Si RMN de la pasta sometida a condiciones de verano muestra una señal Q^2 más evidente que la pasta de referencia indicando que la temperatura favorece la formación de cadenas formadas por más de dos iones silicato. Sin embargo, a esta edad, el CSH formado en la pasta de referencia está compuesto fundamentalmente por dímeros. Esto indica que la temperatura, además de influir en la cantidad de CSH formado a edades tempranas, también afecta a su morfología.

3.4.2 Microscopía Electrónica de Barrido (SEM).

Se muestran a continuación algunas de las fotografías tomadas con el microscopio electrónico sobre las pastas de cemento estudiadas.

3.4.2.1 Pasta de referencia.

La Foto. 1 muestra la pasta de referencia a la edad de 48 horas, en la cual puede notarse una microestructura caracterizada por el desarrollo de CSH recubriendo las originales partículas de cemento.

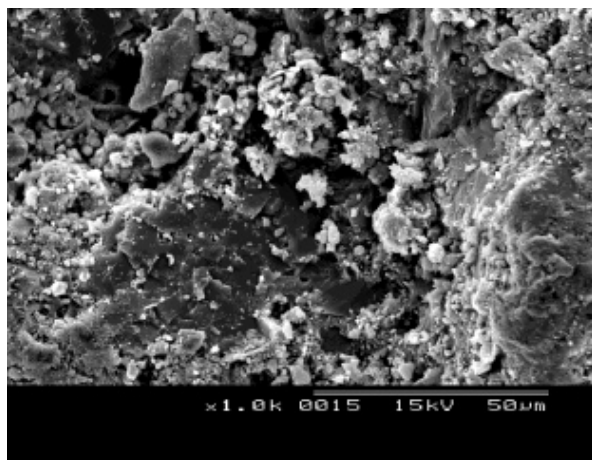


Foto. 1. Pasta de referencia, 48 horas (x1000 a 50 µm).

A la edad de 7 días, se observa en la Foto. 2 el extensivo crecimiento de CSH recubriendo los granos originales de cemento que ya no pueden distinguirse.

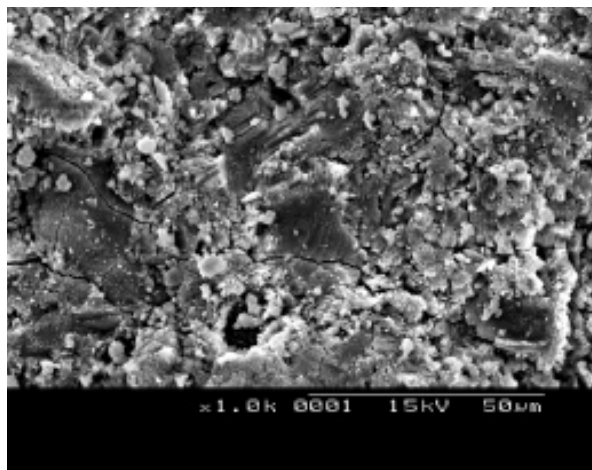


Foto. 2. Pasta de referencia, 7 días (x1000 a 50 µm).

La pasta de referencia a la edad de 28 días muestra un aspecto muy similar a la de la edad de 7 días con una microestructura muy homogénea como se puede ver en la Foto. 3.

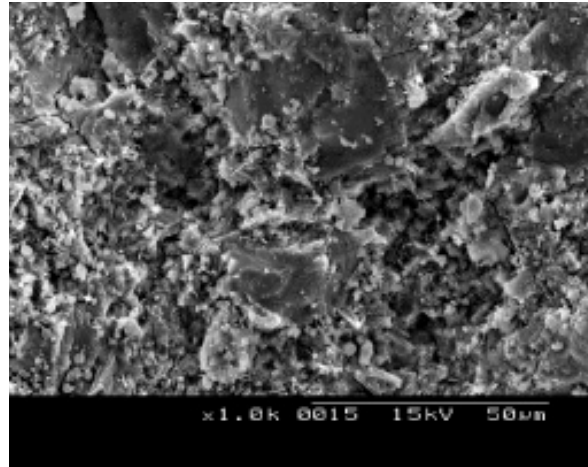


Foto. 3. Pasta de referencia, 28 días (x1000 a 5 µm).

3.4.2.2 Pasta de verano.

La pasta de cemento sometida a condiciones extremas de verano muestra, a la edad de 48 horas, una gran integridad debido a la extensiva formación de CSH recubriendo las originales partículas anhidras de cemento como muestra la Foto. 4.

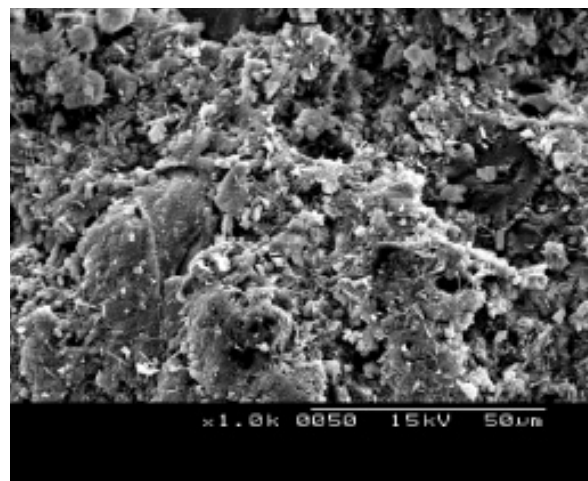


Foto. 4. Pasta de verano, 48 horas (x1000 a 50 µm).

Destaca en la pasta sometida a condiciones de verano a la edad de 7 días, la formación de numerosos cristales en forma de placas entrecruzadas formando un ángulo entre sí de 60°, como lo muestra la Foto. 5.

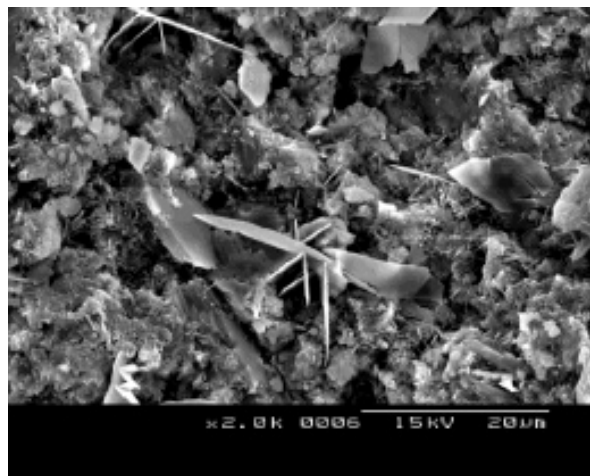


Foto. 5. Pasta de verano, 7 días (x2000 a 20 µm).

La pasta de cemento sometida a condiciones de verano muestra a la edad de 28 días, un crecimiento extensivo de CSH, como puede verse en la Foto. 6.

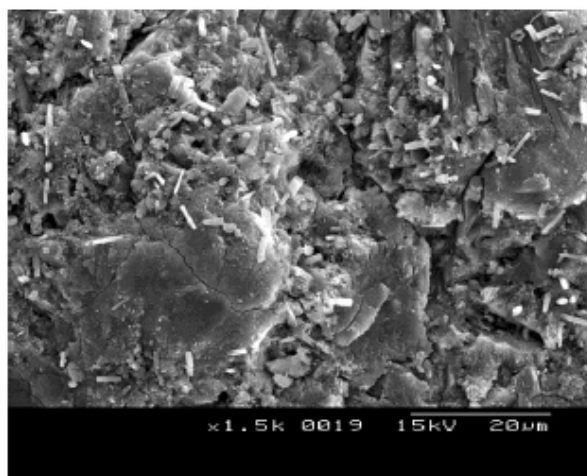


Foto. 6. Pasta de verano, 28 días (x1500 a 20 µm).

3.4.2.3 Pasta de invierno.

Como se puede observar en la Foto. 7, la pasta de cemento sometida a condiciones de invierno muestra a la edad de 48 horas, una microestructura caracterizada por una baja cohesión entre las partículas parcialmente anhidras del cemento debido a la escasa formación de CSH. Destaca la presencia de numerosos y diminutos cristales con morfología cúbica y también se observan pequeños cristales de etringita.

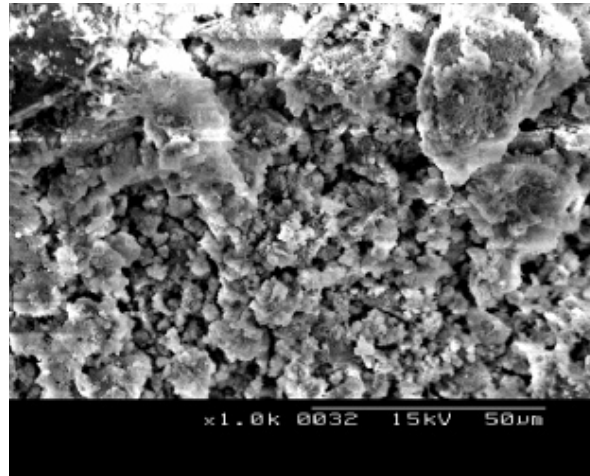


Foto. 7. Pasta de invierno, 48 horas (x1000 a 50 µm).

A la edad de 7 días se observa el desarrollo del CSH recubriendo los originales granos de cemento y una gran cantidad de cristales prismáticos así como cristales de etringita distribuidos por la zona de fractura observada a través de SEM, como lo muestra la Foto. 8.

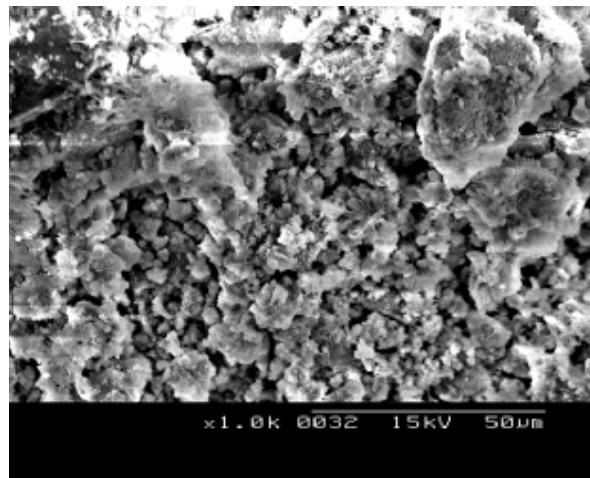


Foto. 8. Pasta de invierno, 7 días (x1500 a 20 µm).

A la edad de 28 días, la pasta muestra una microestructura caracterizada por la formación de CSH con un aspecto muy denso y compacto, como se puede observar en la Foto. 9.

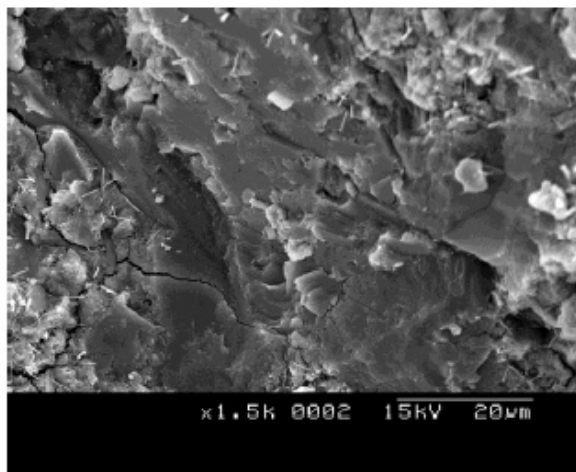


Foto. 9. Pasta de invierno, 28 días (x1500 a 20 µm).

4. DISCUSIÓN

En función de los resultados obtenidos y comportamientos observados en los ensayos experimentales, podemos decir que la trabajabilidad del mortero depende de las propiedades de los agregados, y que éstas a su vez son influenciadas en cierta medida por la temperatura.

La trabajabilidad de los morteros fabricados bajo condiciones de referencia fue mejor, debido a la posición intermedia de la arena entre dos condiciones desfavorables (verano e invierno), térmicamente hablando. En verano esta condición desfavorable es causada por una elevada velocidad de absorción de los agregados y en invierno por una fricción mayor de la arena a más bajas temperaturas.

Las curvas de fluidez obtenidas con el cono de Marsh muestran que la fluidez inicial de las pastas no depende de forma significativa de la temperatura, lo cual corresponde en cierta medida con lo visto en estudios similares hechos por Fernández y Casanova [19]. Este aspecto debe entenderse en el contexto de unas pastas altamente fluidas en las que, tanto la temperatura como la incorporación del aditivo polifuncional no permiten obtener una variación significativa del tiempo de fluidez.

Otro aspecto a destacar es que el punto de saturación en el concreto puede diferir notablemente del obtenido en pasta de cemento por diversos motivos entre los que cabe destacar, un mezclado más enérgico en el concreto debido al tipo de mezcladora industrial y la acción de los agregados durante el mezclado, y la presencia de agregados con un elevado coeficiente de absorción.

Los resultados del estudio de la pérdida de fluidez de las pastas con el tiempo muestran tendencias interesantes. Se observa que, así como la incorporación de aditivo químico no afecta significativamente a la fluidez inicial de las pastas, su presencia es absolutamente fundamental para obtener un buen mantenimiento de la fluidez durante un periodo de dos horas en las tres temperaturas estudiadas. Además, la pasta de cemento sin aditivo muestra una importante pérdida de fluidez con el tiempo a temperaturas elevadas, efecto que no se observa en las pastas con aditivo polifuncional. Esta observación vuelve a confirmar la necesidad de incorporar aditivo químico con el objetivo de obtener un correcto mantenimiento de la fluidez durante las dos primeras horas.

La demanda de agua de la pasta de cemento sin aditivo polifuncional muestra un comportamiento diferente al de las pastas con aditivo. En este sentido, las pastas con aditivo químico requieren una mayor cantidad de agua para mantener la consistencia normal al aumentar la temperatura, es decir, su demanda de agua aumenta con la temperatura.

Los resultados obtenidos analizando las pastas de cemento mediante SEM indican, a la edad de 48 horas, un mayor desarrollo microestructural en la pasta de referencia y en la pasta sometida a condiciones de verano. En estos casos la formación de gel CSH recubriendo las originales partículas de cemento es evidente. Sin embargo, en la pasta sometida a condiciones de invierno se pueden distinguir claramente los granos anhidros de cemento escasamente unidos entre sí.

A la edad de 7 días, las tres pastas estudiadas muestran una microestructura caracterizada por un evidente desarrollo de CSH que recubre las originales partículas de cemento. Sobre la superficie de fractura de cada pasta se observan diferentes fases cristalinas cuya naturaleza, morfología y tamaño dependen significativamente de las condiciones de curado.

A la edad de 28 días, las diferencias entre las tres pastas estudiadas son poco significativas, de acuerdo con los resultados obtenidos mediante RMN, y radican principalmente en el tipo de fases cristalinas observadas sobre la superficie de fractura formada por un extensivo crecimiento de CSH.

En resumen, los estudios realizados mediante RMN y SEM en pastas de cemento sometidas a diferentes condiciones climáticas ponen de manifiesto ciertas diferencias en la cantidad y morfología del gel amorfo CSH, principal producto de hidratación responsable del desarrollo de resistencias, especialmente hasta la edad de 7 días. Sin embargo, a la edad de 28 días estas diferencias son menos significativas.

Por otro lado, en las tres edades estudiadas (48 horas, 7 y 28 días), las diferencias más apreciables entre las tres pastas tienen lugar en la formación de las diferentes fases cristalinas. Estas fases, aunque no contribuyen de forma significativa al desarrollo de resistencias en la pasta de cemento, ponen de manifiesto la existencia de diferentes procesos de cristalización y la influencia de la temperatura en las reacciones de hidratación del cemento.

5. APLICACIONES INDUSTRIALES

Es preciso mencionar que este estudio estuvo enfocado desde el principio a desarrollar aplicaciones industriales para optimizar las sobredosificaciones del concreto en climas cálidos [12]. En función de los resultados obtenidos y de la formulación metodológica propuesta en esta investigación, es posible optimizar estas dosificaciones de cemento cada día en función de ciertos parámetros ambientales, teniendo al final una reducción en los costos de producción y en la cantidad de cemento a emplear, lo cual tiene ventajas desde el punto de vista económico y ambiental. Una vez formuladas las bases metodológicas y verificada experimentalmente en laboratorio su viabilidad [20], se procedió a implementar dicho planteamiento a nivel industrial en tres plantas de producción de concreto premezclado, ubicadas en los municipios de Pallejà, Cabrera de Mar y La Garriga, dentro del territorio de Cataluña, España, durante el verano del año 2005 (en los meses de junio, julio y agosto). El resumen de los resultados obtenidos en las tres plantas de producción se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Resumen de resultados de plantas de producción de concreto.

Parámetro/ Planta	Pallejà	Cabrera de Mar	La Garriga
Resistencia a compresión media (%)	127.9	116.1	121.5
Coefficiente de variación (%)	13.4	12.9	12.6
Sobreconsumo de cemento (kg/m ³)	6.3	5.9	11.1
Consumo total de cemento (kg/m ³)	280.9	289.9	301.3
Ahorro relativo de cemento (kg/m ³)	8.8	9.1	3.9
Revenimiento (cm)	8.0	7.8	7.7

Los coeficientes de variación, en general pueden considerarse aceptables ya que son muy cercanos al 13%, considerando que se trata de un proceso industrial con consumos de cemento variables. El ahorro relativo en el consumo de cemento promedio fue de casi un 35% para las tres plantas, conseguido mediante la optimización de los consumos de cemento en función de la implementación de la formulación propuesta. Asimismo, en ningún caso se reduce el contenido mínimo de cemento especificado por la Instrucción EHE, lo que garantiza la adecuada durabilidad de estos concretos.

6. CONCLUSIONES

- El coeficiente de absorción de las arenas aumenta con el incremento de la temperatura.
- Dentro del rango de tiempos de saturación estudiados (30 minutos y 24 horas), las diferencias son poco significativas, lo que representa que el mayor porcentaje de absorción se produce durante los primeros minutos, lo que significa pérdidas de trabajabilidad inicial.
- En el caso del mortero, la peor consistencia se obtuvo para las condiciones de verano y, en relación al contenido de humedad, los mejores resultados se obtuvieron generalmente con contenidos de humedad cercanos al grado de saturación y superficie seca (SSD).
- En relación al método de mezclado, el método 2 (en el cual se añade parte del agua junto con la arena en el inicio del mezclado y el resto del agua casi al final del proceso, después de haber añadido el cemento) resultó en mejores consistencias.
- La fluidez de las pastas de cemento estudiadas no depende de la temperatura. Estas pastas presentan una elevada fluidez y, por tanto, no se obtienen variaciones sustanciales del tiempo de fluidez.
- El punto de saturación determinado en pasta de cemento no depende de la temperatura.
- Existe un elevado consumo de aditivo por parte de las arenas y justifica la gran diferencia observada entre el punto de saturación en pasta y la dosis empleada en el concreto.
- La demanda de agua de las pastas de cemento con aditivo polifuncional aumenta al aumentar la temperatura.
- Las condiciones climáticas extremas influyen en el desarrollo microestructural y la formación del gel CSH, principal producto de hidratación responsable del desarrollo de resistencia, especialmente en las edades más tempranas.
- En cuanto a posibles aplicaciones industriales en la producción de concreto premezclado, es posible optimizar el consumo de cemento a través del estudio de algunas propiedades de los agregados y del propio concreto que dependan de la temperatura.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento al Grupo Cementos Molins por la financiación de este proyecto a través de los convenios de colaboración C-4669 y C-5737, especialmente a Domènec Masó y a Juan Puig. Asimismo, a Luis Agulló, Tomàs García y Ravindra Gettu, así como al personal técnico del Laboratorio de Tecnología de Estructuras, de la Universitat Politècnica de Catalunya. Igualmente, el primer autor desea agradecer el apoyo recibido de la Universidad Autónoma de Aguascalientes y del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México (CONACyT).

REFERENCIAS

- [1] A.M. Neville, Adam M., *Properties of Concrete*, (fourth edition). England, Pearson Education Limited, 1999.
- [2] J. Ortiz, A., Aguado, L., Agullo, T. Garcia, "Influence of environmental temperatures on the concrete compressive strength: simulation of hot and cold weather conditions", *Cement and Concrete Research*, 2005, 35, 1970-1979.
- [3] Sukumar, A.P., Seabrook, Phil, Sherstobitoff, John y Huber, Frank, "Reconstruction of the Little Mountain Reservoir", *Concrete International*, 2006, 28-02, pp. 44-49.
- [4] Roskovic, R., y Bjegovic, D., "Role of mineral additions in reducing CO₂ emission", *Cement and Concrete Research*, 2005, 35, 974-978.
- [5] Gartner, E., "Industrially interesting approaches to 'low-CO₂' cements", *Cement and Concrete Research*, 2004, 34, 1489-1498.
- [6] Calmon, Joao Luiz, "Estudio térmico y tensional en estructuras masivas de hormigón. Aplicación a las presas durante la etapa de construcción", Tesis doctoral, Departamento de Ingeniería de la Construcción, Universidad Politècnica de Cataluña, Barcelona, España, 1995.

- [7] Nambiar, O.N.N. y Krishnamurthy, V., "Control of temperature in mass concrete pours" *Indian Concrete Journal* 1984, 58-3, pp. 67-73.
- [8] Schrader, E.K., "Control heat for better concrete", *Concrete Construction*, 1987, 32-9, pp. 767-770.
- [9] Ujhelyi, J.E., y Ibrahim, A.J., "Hot weather concreting with hydraulic additives", *Cement and Concrete Research*, 1991, 21-2-3, pp. 345-354.
- [10] Bentz, D.P. y Haecker, C.J., "An argument for using coarse cements in high-performance concretes", *Cement and Concrete Research*, 1999, 29-4, pp. 615-618.
- [11] Tanaka, I., Suzuki, N., Ono, Y. y Koishi, M., "A comparison of the fluidity of spherical cement with that of broad cement and a study of the properties of fresh concrete using spherical cement", *Cement and Concrete Research*, 1999, 29-4, pp. 553-560.
- [12] Ortiz, J., "Estudio experimental sobre la influencia de la temperatura ambiental en la resistencia del hormigón preparado", Tesis doctoral, Departamento de Ingeniería de la Construcción, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España, 2005.
- [13] Ortiz, J.A., Aguado, A., Agulló, L. y García, T., "Performance improving application for ready mix concrete in hot weather environments", Eds., Voyiadjis G y Dorgan R. Electronic Proceedings of the Materials & Mechanics 2005 Congress-American Society of Civil Engineers, USA, Baton Rouge, Louisiana, 2005.
- [14] Poon, C.S., Shui, Z.H., Lam, L., Fok, H. y Kou, S.C., "Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete", *Cement and Concrete Research*, 2004, 34-1, pp. 31-36.
- [15] Roncero, J., "Effect of superplasticizers on the behavior of concrete in the fresh and hardened states: Implications for High Performance Concrete", Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España, 2000.
- [16] Reinhardt, H.W., "Relation between the microstructure and structural performance of concrete", *Concrete Technology: New Trends, Industrial Applications*, Ed. Aguado, A., Gettu, R. y Shah, S.P., RILEM, Ed. E & FN Spon – Chapman & Hall, 1998, pp. 19-32.
- [17] Zanni, H., Rassem-Bertolo, R., Fernandez, L., Masse, S. y Nieto, P., "La résonance magnétique nucléaire: une technique pour l'étude des ciments", *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 1995, 195, pp. 61-72.
- [18] Buenfeld, N.R., Okundi, E., "Release of air from unsaturated aggregate during setting of concrete", *Construction and Building Materials*, 1999, 13-3, pp. 143-147.
- [19] Fernández-Altable, V., e Casanova, I., "Influence of mixing sequence and superplasticiser dosage on the rheological response of cement pastes at different temperatures", *Cement and Concrete Research*, 2006, 36, pp. 1222-1230.
- [20] Ortiz, J., Aguado, A., Agulló, L. y García, T., "Ready mix concrete optimization for hot weather climates (ID: 13-39)", Proceedings of the 2nd International Congress-Fédération Internationale du Béton (fib), Italia (Nápoles), 2006.