

Influencia de la temperatura ambiental en las propiedades del concreto hidráulico

Ortiz Lozano, J. A.¹, Aguado de Cea, A.², Zermeño de León, M. E.³ y Alonso Farrera, F. A.⁴

Recibido: 14 de marzo de 2007 – Aceptado: 3 de julio de 2007

RESUMEN

Durante los meses de verano el concreto premezclado sufre efectos negativos sobre sus prestaciones en estado fresco y endurecido. En este trabajo se presentan los resultados obtenidos en un proyecto de investigación cuyo objetivo principal es el de optimizar la dosificación de cemento en el concreto fabricado bajo condiciones elevadas de temperatura. Los estudios realizados comprenden principalmente campañas experimentales con concreto y con agregados, afectados por situaciones climáticas específicas, simulando condiciones de verano e invierno. Las conclusiones finales dan pauta a potenciales aplicaciones industriales con el fin de disminuir los efectos negativos sobre el concreto y de generar beneficios económicos y medioambientales.

Palabras clave: concreto, agregados, temperatura ambiental, trabajabilidad, resistencia a compresión

Environmental temperature influence on the hydraulic concrete properties

ABSTRACT

During the summer months the ready mix concrete suffers some negative effects on its performance in both, fresh and hardened states. In this article, the results of a research work, whose main objective was the optimization of concrete characteristics in hot weather environments, are presented. The studies were carried out including several experimental stages of concrete and aggregates affected by specific climatic conditions, through the modeling of hot and cold weather conditions. The final results suggest some potential industrial applications of them with the purpose of decreasing the negative effects on concrete and create economical and environmental benefits.

Keywords: concrete, aggregates, environmental temperature, workability, compressive strength

¹ Profesor Investigador, Universidad Autónoma de Aguascalientes. México. E-mail: aortiz@correo.uaa.mx

² Profesor Investigador, Universitat Politècnica de Catalunya, España

³ Profesor Investigador, Universidad Autónoma de Aguascalientes, México

⁴ Profesor Investigador, Universidad Autónoma de Chiapas, México

INTRODUCCIÓN

La fabricación de concreto premezclado, en condiciones climáticas extremas, ya sean de altas temperaturas o de bajas temperaturas, influye de manera directa en sus características en cualquier etapa del mismo: mezclado, transporte, colocación, curado, así como en las propiedades físicas y mecánicas. Ello constituye una preocupación tanto para los fabricantes como para los constructores, por las evidentes consecuencias negativas que puede tener (Ortiz, 2005; Ortiz *et al.*, 2003). Asimismo, dentro del sector de la construcción es muy conocido que se dan pérdidas de resistencia en los periodos estivales, ya que según los resultados que se obtienen en los laboratorios año tras año, se observa dicho fenómeno de forma recurrente (Mouret, 1997).

A pesar de que el problema de pérdidas de resistencia en el concreto debidas al incremento de la temperatura ambiental en verano ha sido ampliamente estudiado y que es innegable su importancia, no son muchas las investigaciones conocidas que hayan obtenido una posible solución. La mayoría de los manuales de buena práctica se limitan a recomendar algunas acciones a realizar sobre los constituyentes del concreto reduciendo la temperatura de éstos o evitando que las elevadas temperaturas veraniegas incidan en cualquiera de las etapas de fabricación y colocación del concreto.

Una solución muy habitual para hacer frente a este problema consiste en realizar un ajuste en el contenido de cemento del concreto, sobredosificando cemento y agua manteniendo constante la relación agua/cemento. Por lo general, esta política se lleva a cabo desde principios de junio hasta mediados de septiembre, en algunos países con clima mediterráneo, por ejemplo España. La misma se traduce en una sobredosificación de una cantidad fija de cemento sin algún criterio normalizado que determine esta cantidad teniendo en cuenta las condiciones térmicas de cada día y de cada hora del día.

Comella *et al.* (2002) recogen una serie de datos estadísticos de resistencia a compresión simple a 28 días de concretos de 30 MPa, tomadas por un laboratorio de control de calidad y correspondientes a concretos colocados en el Área Metropolitana de Barcelona. La Figura 1 muestra la variación de la temperatura media ambiental y el valor de resistencia media a compresión de los concretos en cada uno de los intervalos analizados. Aunque no se cuenta con los parámetros estadísticos de esta recolección de datos, el valor medio de resistencia a compresión ilustra muy bien la variación de la resistencia del concreto a lo largo del año.

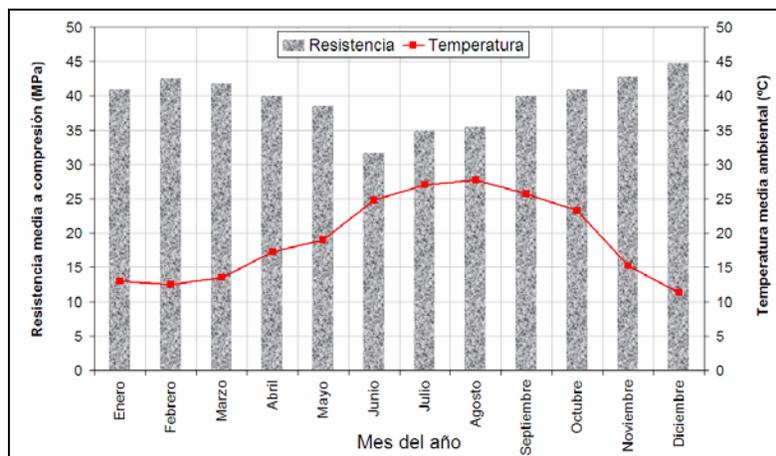


Figura 1. Variación de la temperatura media ambiental y de la resistencia media a compresión del concreto a lo largo de un año ($f'c=30$ MPa)

En la citada figura se observa que la estación en la que se obtuvo menor resistencia fue el verano, obteniéndose la mínima media en el mes de junio. Posteriormente a este mínimo tenemos unas recuperaciones más o menos progresivas a pesar de observar algunas temperaturas mayores que la correspondiente al mes de mínima resistencia, lo que

nos hace suponer que los productores de concreto ante la obtención de resultados bajos, cambian la dosificación de cemento habitual, por otra mayor que aporte la resistencia especificada teniendo finalmente un costo más elevado.

Por otro lado, la temperatura juega un papel muy importante en la trabajabilidad del concreto, siendo

conocido que bajo condiciones de clima cálido, se requiere una mayor cantidad de agua para una determinada consistencia o revenimiento. Por ejemplo Soroka (1993), basado en datos experimentales indica que un aumento de 10 °C en la temperatura del concreto tiene como consecuencia la disminución en el revenimiento inicial de aproximadamente 25 mm; de igual forma, por cada 10 °C de aumento en la temperatura del concreto, se necesitará aumentar entre 4 a 6 kg/m³ de agua para mantener un mismo revenimiento. El efecto de la temperatura en la demanda de agua es principalmente producido por su efecto en la velocidad de la hidratación del cemento y también en la tasa de evaporación del agua (Neville, 1999).

Una vez expuesta la problemática y analizadas las consecuencias, se planteó realizar un estudio de tipo experimental en laboratorio y en condiciones reales de producción, con el objeto de estudiar esta problemática y al mismo tiempo, desarrollar soluciones para la toma de decisiones a nivel industrial

Este estudio tiene como objetivo principal determinar la influencia que cada constituyente del concreto tiene sobre la temperatura en la trabajabilidad y en la resistencia a compresión del mismo. De esta manera se proponen medidas de actuación de implementación a nivel industrial que minimicen estos efectos perjudiciales y que, en conjunto con la metodología desarrollada, eviten al máximo las pérdidas de resistencia del concreto en ambientes de temperaturas ambientales elevadas mediante la optimización de las sobredosificaciones de cemento; todo lo anterior tomando en cuenta la factibilidad técnica y económica de las soluciones propuestas (Ortiz *et al.*, 2006).

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Para dar respuesta satisfactoria a este problema, se planteó un procedimiento experimental cuyas variables principales a estudiar fueron la trabajabilidad y la resistencia a compresión del concreto, afectadas por condiciones climáticas específicas para determinar que tanto afectan estas condiciones térmicas a las propiedades del concreto.

Por otro lado, también se realizaron estudios experimentales sobre dos propiedades físicas de los agregados: la velocidad de absorción a distintos tiempos de saturación y la determinación de los ángulos de reposo.

Estudios al concreto

Para la fabricación del concreto se utilizó cemento Portland CEM I 42,5 R (equivalente al Tipo I ASTM

de 42.5 MPa a 7 días), agregados calizos triturados de tamaños de 12 a 20 mm (grava), 5 a 12 mm (gravilla), 0 a 5 mm (arena gruesa) y 0 a 2 mm (arena fina). El contenido de humedad de los agregados se mantuvo siempre constante y con valores prácticamente de cero, sin embargo, antes de fabricar el concreto se determinaba este contenido de humedad con el objeto de realizar un ajuste para llegar al estado de saturación y superficie seca.

También se utilizó un aditivo químico polifuncional (retardante de fraguado y reductor de agua) en base a sulfonatos surfactantes.

El diseño de la mezcla utilizada corresponde a un concreto de fabricación comercial cuya resistencia nominal es de 25 MPa, con relación agua/cemento de 0.56. El revenimiento de proyecto para este concreto fue de 10 cm. Se mantuvo siempre la misma dosificación con el objeto de observar las variaciones existentes de trabajabilidad y resistencia entre el concreto de referencia y las dos condiciones climáticas de verano e invierno.

Las variables estudiadas fueron afectadas por diferentes condiciones climáticas de temperatura ambiental y humedad relativa. Se realizaron simulaciones térmicas ambientales tanto cíclicas como constantes mediante una cámara climática hermética programable. Dicha cámara climática es capaz de ser programada para reproducir las condiciones ambientales específicas en base a los registros, cada media hora, de temperatura y humedad relativa.

En el caso de las condiciones climáticas cíclicas, se tomaron dos días históricamente extremos de Barcelona en función de un análisis histórico de temperaturas máximas (24 de agosto de 2000) y mínimas (23 de diciembre de 2001) en base a los registros del Observatorio Fabra (Metecat, 2006). Para el caso de las temperaturas constantes, las cuales son las condiciones de referencia, se tomó una temperatura de 20 °C (constante) y una humedad relativa de aproximadamente 95% (constante).

Las probetas de concreto se mantuvieron en sus moldes por 24 horas después de haberse colocado, tiempo durante el cual se llevo a cabo el registro de la temperatura del concreto mediante sondas termopares embebidas en la masa del concreto y conectadas a un dispositivo de adquisición de datos térmicos. Una vez transcurridas las 24 horas después de la fabricación, las probetas se trasladaron a la cámara húmeda, con el objeto de curarse en condiciones estándar (temperatura de 20 °C y humedad relativa superior al

95%). Para cada mezcla (efectuada a diferentes horas del día, 5 en total) se determinó la consistencia del concreto mediante el ensayo del revenimiento y se fabricaron 5 probetas que se ensayaron a compresión a edades de 7 días (2 probetas) y 28 días (3 probetas).

Estudios a los agregados

El objeto de estos procedimientos experimentales es el de determinar y cuantificar algunos parámetros de los agregados, afectados por las condiciones climáticas. Asimismo conocer la influencia final sobre las propiedades del concreto, como la trabajabilidad y la resistencia a compresión.

En este sentido, fueron estudiadas dos propiedades de los agregados: la velocidad de absorción bajo tiempos de saturación de 30 minutos y 24 horas según la norma ASTM C128-01, y los ángulos de reposo y de fricción interna. En este artículo se muestran solamente los resultados correspondientes a los agregados finos o arenas, los cuales son los más representativos.

Estas determinaciones fueron hechas bajo 3 condiciones climáticas constantes, las cuales fueron de 38 °C para representar las condiciones de verano y de 6 °C para las de invierno. Para el caso de las condiciones de referencia, se tomó una temperatura de 20 °C (constante) y una humedad relativa de aproximadamente 95% (constante).

La forma de determinar los ángulos de reposo y de fricción interna consistió en calcular el ángulo de talud natural de las arenas para las tres condiciones climáticas establecidas, debido a que era prácticamente imposible determinar los ángulos de

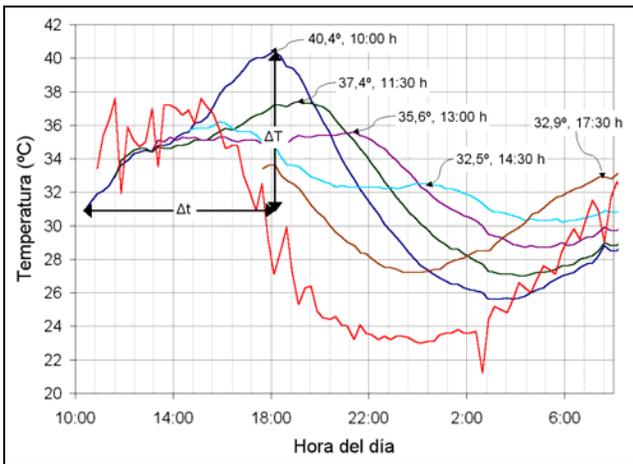


Figura 2. Perfiles térmicos de los concretos en verano

rozamiento interno reales mediante el ensayo de corte directo (norma ASTM D3080-98) a temperaturas altas y bajas, dado que no era posible trasladar el equipo a la cámara climática. El ensayo de corte directo se realizó para las arenas solamente en condiciones de referencia, que eran las condiciones presentes en el Laboratorio de Mecánica de Suelos de la Universidad Politécnica de Catalunya (UPC).

RESULTADOS OBTENIDOS Y ANÁLISIS

Estudios al concreto

A continuación se muestran los resultados térmicos obtenidos en los ensayos con el concreto para las condiciones de verano. La Figura 2 presenta los perfiles térmicos del concreto para cada una de las horas de fabricación, junto con el registro de la temperatura ambiental. En esta figura se indica la temperatura máxima que alcanzó el concreto y la hora de fabricación del mismo. También se representa gráficamente la variación térmica (ΔT) comprendida entre la temperatura inicial (T_i) y la temperatura máxima (T_{max}) y el tiempo de reacción (Δt) transcurrido entre el momento de la temperatura inicial (T_i) y el momento de máxima temperatura (T_{max}). Por otro lado, en la Figura 3 se muestra la relación de la variación térmica ($\Delta T = T_{max} - T_{min}$) y el tiempo de reacción ($\Delta t = t_{max} - t_{min}$).

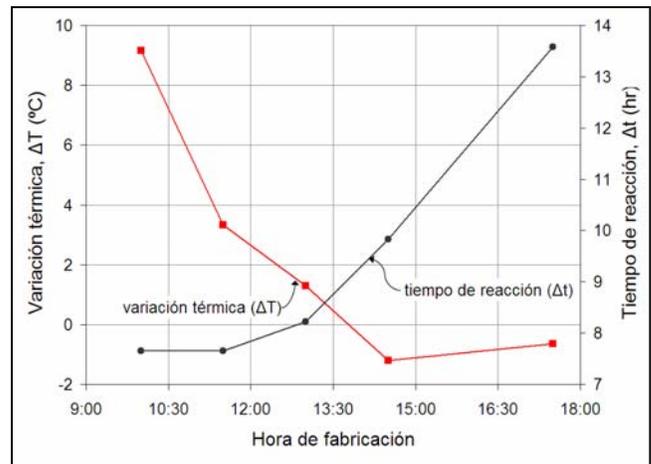


Figura 3. Variación térmica y tiempo de reacción de los concretos en verano

En función de las gráficas anteriores, se puede señalar que el tiempo de reacción (Δt) transcurrido entre el momento de la temperatura inicial (T_i) y el momento de máxima temperatura (T_{max}) es mayor en las últimas horas del día, e igualmente este tiempo es menor en las primeras horas del día. De esta forma, cuando las variaciones de temperatura (ΔT), debidas a la temperatura ambiente y a las reacciones exotérmicas del cemento en el concreto, son en el mismo sentido (pendiente positiva), la cinética es más rápida y consecuentemente los tiempos de reacción (Δt) son menores. Igualmente, se puede ver que la variación térmica (ΔT) entre la temperatura inicial (T_i) y la temperatura máxima (T_{max}) debida a las reacciones exotérmicas, disminuye en las últimas horas del día y viceversa. Estas menores variaciones de temperatura tienen efectos positivos desde el punto de vista de la resistencia mecánica.

La Figura 4, contiene el resumen de los resultados de resistencia mecánica (28 días) y de trabajabilidad obtenidos con los concretos, para verano e invierno. En este caso, los valores obtenidos para el concreto de referencia fueron los siguientes: revenimiento = 9.0 cm y resistencia a compresión (28 días) = 43.3 MPa.

En la Figura 4 vemos que los valores de resistencia a compresión son mayores en invierno que en verano, teniendo como punto intermedio el concreto de referencia. Analizando las tendencias por condición climática y en función de la hora de fabricación, a las últimas horas del día las resistencias son mayores.

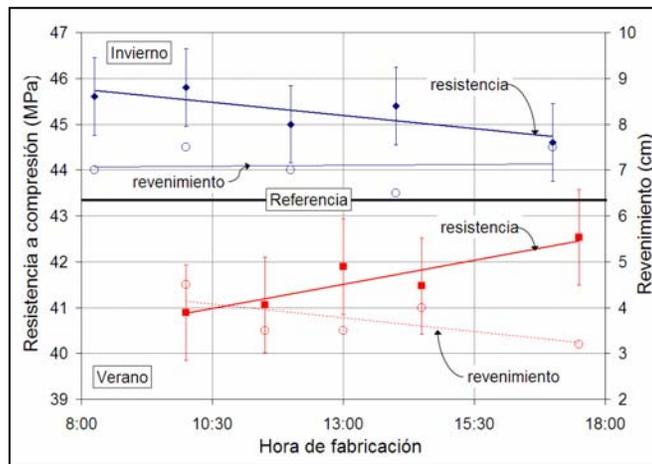


Figura 4. Resultados de resistencia a compresión (28 días)

Por otro lado, el revenimiento obedece a la temperatura de los constituyentes del concreto, que a su vez son influenciados por la temperatura ambiental, en este caso los mejores valores corresponden a las condiciones de referencia, y los más desfavorables a las condiciones de verano. Su influencia sobre la resistencia es un factor menos importante que las relaciones térmicas y de tiempos de reacción antes señalados.

Los fenómenos observados en esta serie experimental, pueden ser sintetizados de la siguiente manera: una precipitación rápida y no uniforme de los productos de hidratación, como consecuencia de un curado a temperaturas superiores a la ambiente, genera una disposición espacial “más desordenada” de dichos productos lo que a su vez produce un desarrollo microestructural más heterogéneo y menos compacto (sistema poroso menos refinado) que se refleja en un

menor aumento de resistencias mecánicas a lo largo del tiempo (Ortiz, 2005; Ortiz et al., 2005a).

Estudios a los agregados

Los resultados de velocidad de absorción bajo los dos tiempos de saturación y en función de la temperatura se muestran a continuación en la Figura 5.

La magnitud de la absorción es mayor para las arenas más finas debido a su mayor superficie específica, ahora, se observa también que a mayor temperatura los coeficientes de absorción son mayores.

La diferencia en absorción entre 30 minutos y 24 horas se reduce al aumentar la temperatura; estas diferencias son casi nulas a las temperaturas más altas. Estas observaciones tienen consecuencias muy significativas para la trabajabilidad del concreto en verano, ya que los agregados absorberán más agua en

menos tiempo, ocasionando pérdidas de trabajabilidad y menores tiempos de fraguado.

concreto en verano, ya que gran parte del agua es absorbida por los agregados inmediatamente después de ser mezclado el concreto.

Desde un enfoque práctico, estos resultados ilustran el ya conocido problema de pérdida de trabajabilidad del

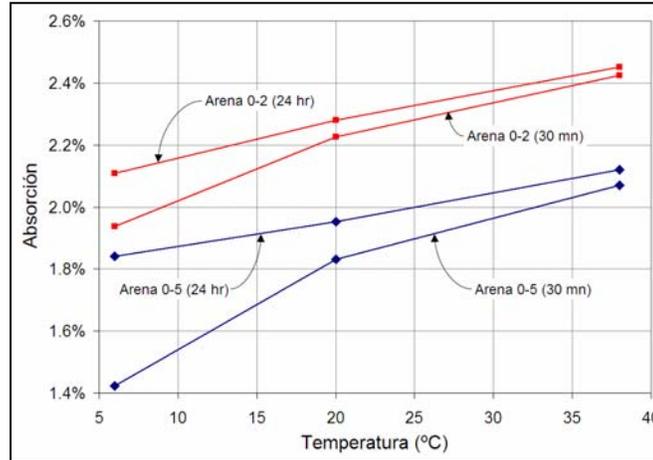


Figura 5. Velocidad de absorción de los agregados

La Tabla 1 muestra los ángulos de reposo obtenidos. Como referencia, los valores correspondientes a los ángulos de fricción interna obtenidos según la norma ASTM D3080-98, son de 42.2° (arena de 0 a 5 mm) y 46.0° (arena de 0 a 2 mm).

DISCUSIÓN

Tendencias generales

De los resultados y tendencias observados en los ensayos experimentales, se podría inducir que la trabajabilidad del concreto está influenciada por las propiedades de los agregados que son susceptibles de variaciones en función de la temperatura.

Los ángulos de reposo decrecen en función de la temperatura; en este caso, los valores de la arena más fina son mayores. Las curvas de comportamiento aquí vistas son muy tenues, sin embargo desde un punto de vista de tendencias, estos resultados confirman que la fricción interna de los agregados varía con la temperatura, aunque de manera casi imperceptible.

En el caso del concreto, los valores obtenidos de trabajabilidad indican que la mejor situación es bajo las condiciones de referencia, debido a la posición intermedia de los agregados entre alta absorción y alto valor de fricción interna.

Tabla 1. Ángulos de reposo de las arenas

Condición climática	Invierno	Referencia	Verano
Arena 0-5 mm	32.7°	32.4°	31.0°
Arena 0-2 mm	36.6°	36.4°	34.8°

En resumen y de manera global, podemos decir que la temperatura actúa sobre la velocidad de absorción y la fricción interna de los agregados, mientras que en el concreto tiene un efecto sobre su desempeño (estado fresco y endurecido). Por otro lado, en función de que normalmente en períodos de verano se realiza un ajuste en la cantidad de cemento y aditivo a dosificar con el objeto de compensar las pérdidas de resistencia, también se tiene un efecto negativo sobre el costo final del concreto (consumo de cemento). Estas relaciones son mostradas gráficamente en la Figura 6.

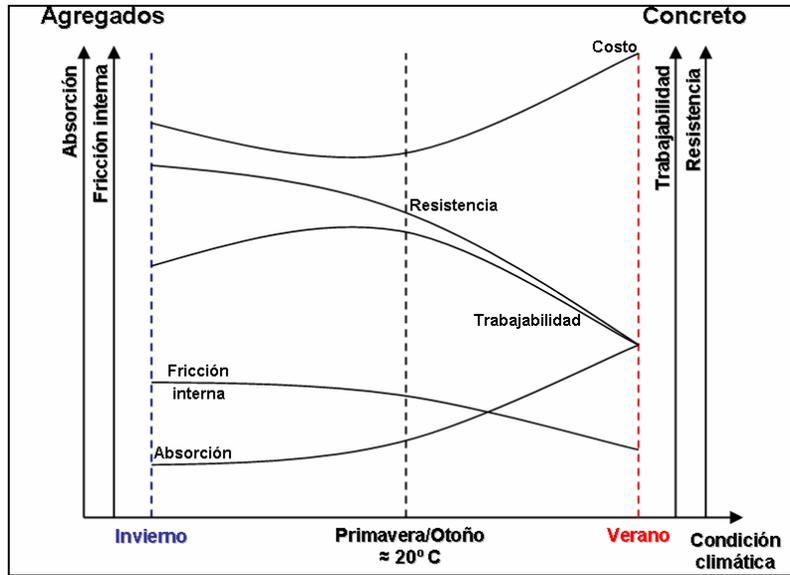


Figura 6. Relaciones entre las propiedades de los agregados y el comportamiento del concreto

Potenciales aplicaciones industriales

Con el propósito de reducir costos e impacto medioambiental, el consumo de cemento en el concreto puede ser optimizado en función de variables dependientes de la temperatura. De hecho, algunos de los resultados aquí presentados han sido aplicados a escala industrial de producción, obteniendo resultados satisfactorios en relación a reducciones en costos mediante la optimización de los consumos de cemento en el concreto en verano (Ortiz, 2005).

CONCLUSIONES

A raíz de los trabajos realizados, los resultados apuntan a que cuando menores son las variaciones térmicas del concreto, mejores son los resultados relativos a prestaciones mecánicas, sin intervenir en las prestaciones del concreto en estado fresco.

El coeficiente de absorción de los agregados finos aumenta con el incremento de la temperatura ambiental y la de su propia 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 en términos prácticos, podría explicar la poca trabajabilidad y pérdida de

trabajabilidad en el concreto bajo condiciones de alta temperatura.

La fricción interna de los agregados (medida mediante los ángulos de reposo y rozamiento interno en arenas) es menor a mayor temperatura; en este caso los valores de estos ángulos serán mayores para arenas con mayor módulo de finura.

Por otro lado, en base a los resultados observados en las determinaciones experimentales realizadas, se observa que el agregado es uno de los factores más importantes desde este punto de vista, no sólo por las características específicas de su comportamiento con la temperatura, sino también, porque es el componente de mayor proporción en el concreto.

RECONOCIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento al Grupo Cementos Molins por el financiamiento de este proyecto, especialmente a Domènec Masó y a Juan Puig, por su valiosa asesoría técnica y científica. Asimismo a Luis Agulló Fité y a Tomàs García Vicente de la Universitat Politècnica de Catalunya, así como al personal del Laboratorio de Tecnología de Estructuras de la UPC, quienes participaron directamente en estos trabajos. Igualmente, el primer autor desea agradecer el apoyo recibido del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Comella, J., Picó, S., Taure, E. (2002). Las Pérdidas de Resistencia del Hormigón durante el Verano. En Anales de Construcciones y Materiales Avanzados 1, 49-58, Departament d'Enginyeria de la Construcció, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.

Mouret M., Bascoul A., Escadeillas G. (1997). Drops in Concrete Strength in Summer Related to the Aggregate Temperature, Cement and Concrete Research, 27(3), 345-357.

Neville, A.M. (1999). Properties of Concrete, fourth edition. Pearson Education Limited, England.

Ortiz Lozano J.A. (2005). Estudio experimental sobre la influencia de la temperatura ambiental en la resistencia del hormigón preparado. Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona, España.

Ortiz Lozano J.A., Aguado de Cea A., Agulló Fité L., Gettu R., García Vicente, T. (2003). Influencia de las altas temperaturas en el comportamiento del hormigón: simulación de las condiciones de verano. En Memorias del VIII Congreso Latinoamericano de Patología de la Construcción y IX Congreso de Control de Calidad en la Construcción (CONPAT 2003), Castro P., Moreno E. (Editores), Yucatán, México.

Ortiz J., Aguado A., Agulló L., García T. (2005). Influence of environmental temperatures on the concrete compressive strength: simulation of hot and cold weather conditions. Cement and Concrete Research, 35 (10), 1970-1979.

Ortiz Lozano J.A., Aguado de Cea A., Agulló Fité L., García Vicente, T. (2005). Performance improving application for ready mix concrete in hot weather environments. En Memorias Electrónicas del Congreso Materials & Mechanics 2005 - American Society of Civil Engineers, Baton Rouge, Louisiana, Estados Unidos.

Ortiz Lozano J.A., Aguado de Cea A., Agulló Fité L., García Vicente, T. (2006). Ready mix concrete optimization for hot weather climates. En Memorias del 2nd International FIB Congress (Fédération Internationale du Béton), ID 13-39, Nápoles, Italia.

Soroka I. (1993). Concrete in Hot Environments, E & FN Spon, London.

UPC, CMI, PROMSA. (2002). Conjunto de trabajos realizados en el marco del convenio. Informe Conjunto Final, Convenio C-4669. Universidad Politècnica de Catalunya, Barcelona, España.

Meteocat, Servei Meteorològic de Catalunya, (2006). Departament de Medio Ambiente, Generalitat de Catalunya, Barcelona, España. www.meteocat.com

Este documento se debe citar como:

Ortiz Lozano, J. A., Aguado de Cea, A., Zermeño de León, M. E. y Alonso Farrera, F. A. (2007). **Influencia de la temperatura ambiental en las propiedades del concreto hidráulico**. Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY, 11-2, pp. 13-20, ISSN: 1665-529X