

Desarrollo de un modelo computacional para predecir la composición de la pasta de cemento durante el proceso de fraguado

Aníbal Maury¹, Ronald Sanjuán², Nelson Molinares³

Resumen

En este artículo se presenta el desarrollo de un modelo computacional para la predicción de la composición de la pasta de cemento durante la primera parte del proceso de fraguado. El modelo desarrollado integra los conceptos teóricos y los modelos experimentales más importantes relacionados con el proceso de hidratación y la evaporación superficial del agua libre del concreto en estructuras con una alta relación área/espesor construidas en climas cálidos. Adicionalmente, mediante la determinación de la posibilidad que se presente agrietamiento por contracción plástica sobre estructuras de concreto que posean características geométricas que faciliten dicho fenómeno en climas cálidos, el modelo desarrollado permite asistir a ingenieros civiles, arquitectos y constructores en la toma de medidas preventivas frente a este fenómeno que afecta la apariencia de las estructuras y, en muchos casos, disminuye la durabilidad del concreto.

Palabras claves: Control de procesos, fraguado del cemento, composición del cemento, agrietamiento por contracción plástica, agua de mezclado.

Fecha de recepción: 13 de julio de 2007
Fecha de aceptación: 15 de noviembre de 2007

¹Ingeniero Civil, Universidad del Norte. Magíster en Ciencia de los Materiales, Ghent University. Estudiante de Doctorado en Ingeniería Civil, Ghent University (Bélgica).

anibal.mauryamirez@UGent.be

²Ingeniero Civil, Universidad del Norte. Consultor de Ingeniería y Geotécnica. *ronaldsanjuan@civileng.zzn.com*

³Ingeniero Civil, Escuela Colombiana de Ingeniería. Magíster en Ingeniería Sísmica y Dinámica Estructural. Doctor en Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Cataluña (España). Profesor del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad del Norte. *nmolinar@uninorte.edu.co*

Correspondencia: Ghent University. Faculty of Engineering. Department of Structural Engineering. Maignel Laboratory for Concrete Research. Technologiepark Zwijnaarde 904 B-9052 Ghent, Belgium. *anibal.mauryamirez@UGent.be*

Origen de Subvenciones y apoyos: Proyecto Joven Investigador Colciencias.

Abstract

In this paper, a computational model for predicting the cement paste composition during the first part of the setting process is presented. The developed model integrates the main theoretical concepts and experimental models dealing with the hydration process and the evaporation of the free water at the surface of structural elements with high area/thick ratios, which are particularly important in those structures built in hot weather conditions.

Additionally, by determining the cracking vulnerability due to plastic shrinkage in hot weather conditions in concrete structures with particular geometrical characteristics (high area/thick ratios), the developed model assists to civil engineers, architects and constructors in the control process for preventing the crack formation which affects the structures appearance and many times decreases the concrete durability.

Key words: Control process, cement setting, concrete composition, cracking, plastic shrinkage, mixing water.

1. INTRODUCCIÓN

Para desarrollar el modelo de predicción de la estructura de la pasta de cemento fue necesario conocer la evolución en el tiempo de cada una de sus fases, tales como los poros de gel, poros capilares, cemento no hidratado, productos de hidratación.

Conocer lo anterior fue de particular interés para el estudio analítico del fenómeno de agrietamiento por contracción plástica, el cual comienza antes del proceso de curado, principalmente durante las primeras doce horas del proceso de fraguado.

Numerosos estudios han sido desarrollados para analizar la formación y composición de la porosidad y formación de cavidades en el concreto. A partir de ellos ha sido posible, desde hace mucho tiempo, plantear recomendaciones y crear aditivos comerciales que han minimizado este problema. Sin embargo, la inexistencia de modelos analíticos que incorporen el fenómeno de evaporación, el cual es fundamental en el proceso de formación de grietas por contracción plástica durante el proceso de fraguado, ha limitado la predicción, análisis y solución a este problema, que aparte de ser antiestético permite, en algunos casos, la penetración de sales, sulfatos y humedad, acelerando la degradación química del concreto y la corrosión del acero de refuerzo.

Un modelo que integre la evolución de las diferentes fases que componen la pasta de cemento y el proceso de evaporación sería de gran importancia en los climas cálidos donde factores ambientales como la temperatura de colocación, velocidad del viento, luz solar y humedad relativa, intervienen en el fenómeno de agrietamiento por contracción plástica.

En esta investigación se ha desarrollado un modelo computacional que utiliza modelos experimentales y conceptos teóricos para definir la composición de la pasta de cemento junto con la masa o volumen de agua evaporada, durante las primeras doce horas de fraguado.

El *software* que se ha generado en esta investigación permite asistir al ingeniero civil en el proceso de control de obra, mediante la determinación de la posibilidad de que se presente agrietamiento por contracción plástica en algunas estructuras de concreto que tienen características geométricas que facilitan dicho fenómeno, por lo cual la utilización del *software* permite tomar medidas de prevención frente a este factor.

2. ASPECTOS METODOLÓGICOS

Para el desarrollo de este modelo se consideraron las hipótesis de trabajo que se mencionan a continuación.

- *Hidratación*: en esta investigación se ha considerado el grado de hidratación como la relación que existe entre el agua usada hasta el instante (t) en hidratación del cemento y la cantidad máxima teórica necesaria para la hidratación total del cemento. En términos matemáticos:

$$\alpha(t) = A_h(t) / A_{h(100\%)} \Rightarrow A_h(t) = \alpha(t) \times A_{h(100\%)} \quad (1)$$

donde,

t : Tiempo de fraguado

$\alpha(t)$: Grado de hidratación en el instante t:

$A_h(t)$: Agua usada en hidratación en el instante t.

$A_{h(100\%)}$: Contenido teórico de agua necesaria para la hidratación total.

En relación al grado de hidratación también se consideraron los resultados experimentales obtenidos por Kjellsen [1], según los cuales el grado de hidratación y su evolución dependen del tiempo de fraguado y la temperatura ambiental a la cual sucede el proceso (ver Figura 1). De

igual modo, se consideraron los resultados obtenidos por Mönning [2], los cuales indican que el cambio del grado de hidratación en el tiempo no se ve afectado de forma significativa por relación agua/cemento de la mezcla de concreto durante las primeras doce horas de fraguado, tal como se muestra en la Figura 2.

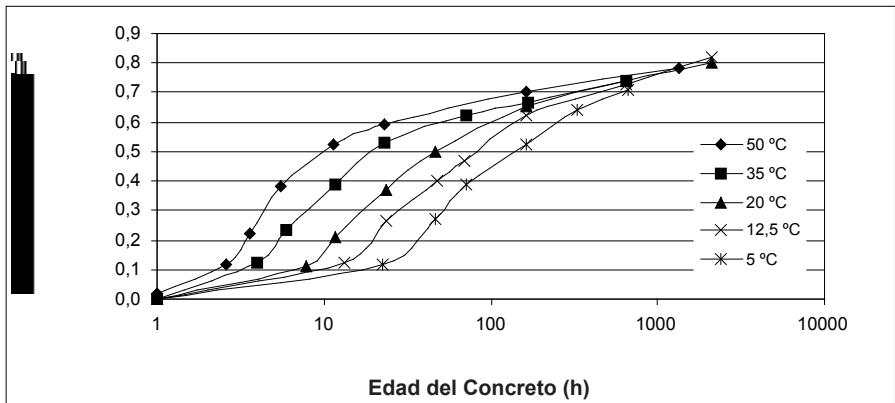


Figura 1. Comportamiento del grado de hidratación en el tiempo [1]

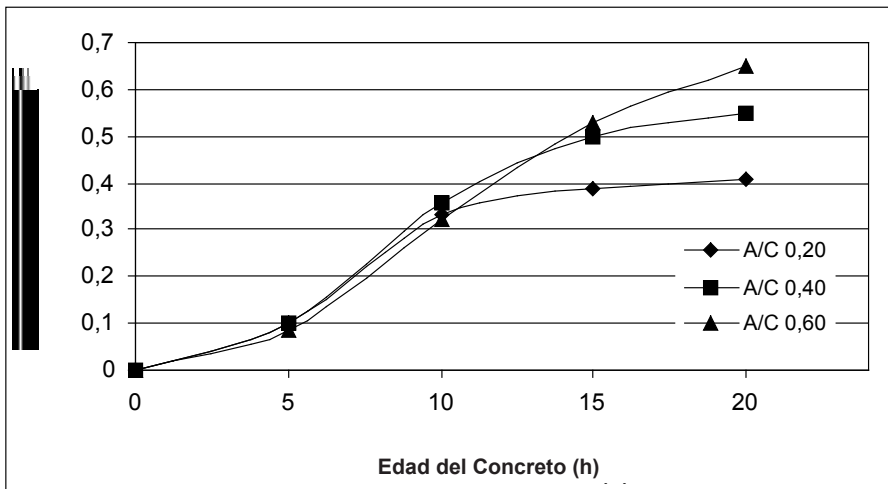


Figura 2. Comportamiento del grado de hidratación en el tiempo con diferentes relaciones a/C [2]

- *Evaporación*: Otro proceso importante que ha sido considerado en el modelo, es el proceso de evaporación de agua libre, el cual fue simulado

según el planteamiento presentado en el ACI 305R [3]. Con éste, se estima la tasa de evaporación del agua libre partiendo de la temperatura del aire, su humedad relativa, la velocidad del viento y la temperatura del concreto. Esta última variable no es de tipo ambiental, y por tanto no es una información que se pueda obtener de datos ambientales históricos, y tampoco de las condiciones de diseño de mezcla, pues éste depende primordialmente del período de fraguado del concreto y, en menor grado, de las condiciones de temperatura inicial.

- *Temperatura del concreto:* A partir de diversas investigaciones sobre el comportamiento de la temperatura del concreto durante el fraguado, como es el caso de Schindler [4] y Mounanga [5], se ha encontrado que la temperatura de un concreto típico aumenta progresivamente conforme avanza el proceso de fraguado, y su valor máximo se encuentra después de las 6 u 8 horas de su inicio, para descender luego a menor rapidez hasta aproximarse sensiblemente a la temperatura ambiental. El modelo desarrollado incluye dentro de sus hipótesis de cálculo la estimación de la temperatura del concreto, según los resultados experimentales obtenidos por Schindler [4], para el caso de temperaturas ambientales mayores a 30°, la cual es la más similar a las condiciones características de los climas cálidos, donde el concreto es más susceptible de presentar agrietamiento por contracción plástica, (ver Figura 3). No obstante, el modelo permite también al usuario ingresar sus propios datos estimados de temperatura del concreto.

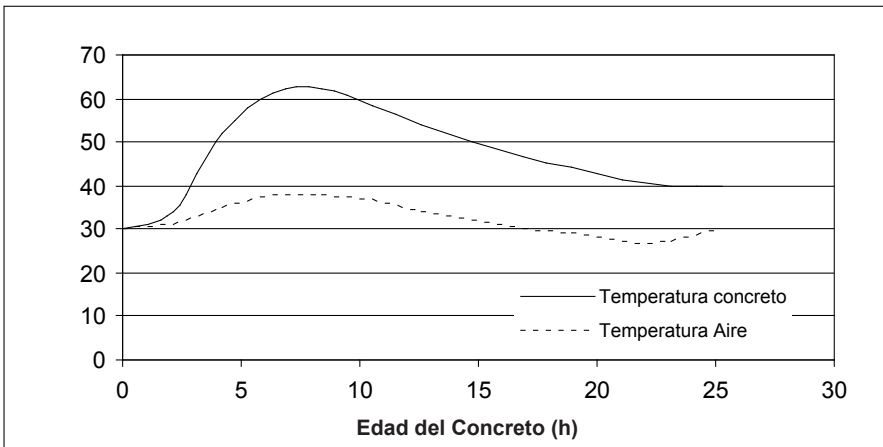


Figura 3. Comportamiento en el tiempo de la temperatura del concreto en climas cálidos [4]

Utilizando las anteriores hipótesis, se logró desarrollar un modelo que predice el estado de la masa de agua dentro de la pasta en cada instante de tiempo, teniendo en cuenta que el contenido de agua total de la mezcla es una constante que será la suma del agua que se utilizó en la hidratación, la parte que se ha evaporado y la parte que permanece aún libre. En términos matemáticos:

$$A = A_h + A_l + A_e = \text{Contenido de agua} = \text{Constante} \quad (2)$$

Dado que las cantidades iniciales son conocidas y también las tasas de variación del contenido de agua hidratada y agua evaporada, es posible determinar éstas durante las primeras doce horas de fraguado.

Para modelar la micro-composición de la pasta de cemento en cada instante durante el proceso de fraguado, se utilizó el modelo desarrollado por Powers, conociendo el grado de hidratación (α) y la relación agua/cemento (A/C) [6].

Volumen de productos de hidratación, incluyendo poros de gel (V_h):

$$V_h = 0.68\alpha(t)C \quad (3)$$

Volumen de cemento no hidratado (V_n):

$$V_n = 0.32 (1-\alpha(t)) C \quad (4)$$

Volumen de poros capilares (V_{pc}):

$$V_{pc} = (A/C - 0,36\alpha(t)) C \quad (5)$$

Volumen de poros de gel (V_{pg}):

$$V_{pg} = 0.16 \alpha(t) C \quad (6)$$

Donde A/C y C son la relación agua/cemento y el contenido de cemento de la pasta, respectivamente, que son datos conocidos del diseño de mezcla.

El factor $\alpha(t)$ corresponde al grado de hidratación en el instante t , y puede obtenerse con la expresión (1), utilizada en la estimación de los estados de la masa de agua (2).

3. MODELO PLANTEADO

Para la implementación del modelo planteado se seleccionó el lenguaje de

programación *Visual Basic*, ya que su interfase con el usuario es muy amigable y su ambiente “Windows” es bastante conocido en el medio ingenieril.

Con el ánimo de satisfacer las diversas necesidades del usuario, el *software* desarrollado para la estimación de la formación de grietas por contracción plástica en el concreto consta de tres modos de operación: “Modo 1” sin tiempo determinado, “Modo 2” de instante determinado, y “Modo 3” para las primeras 12 horas. Ver Figura 4.

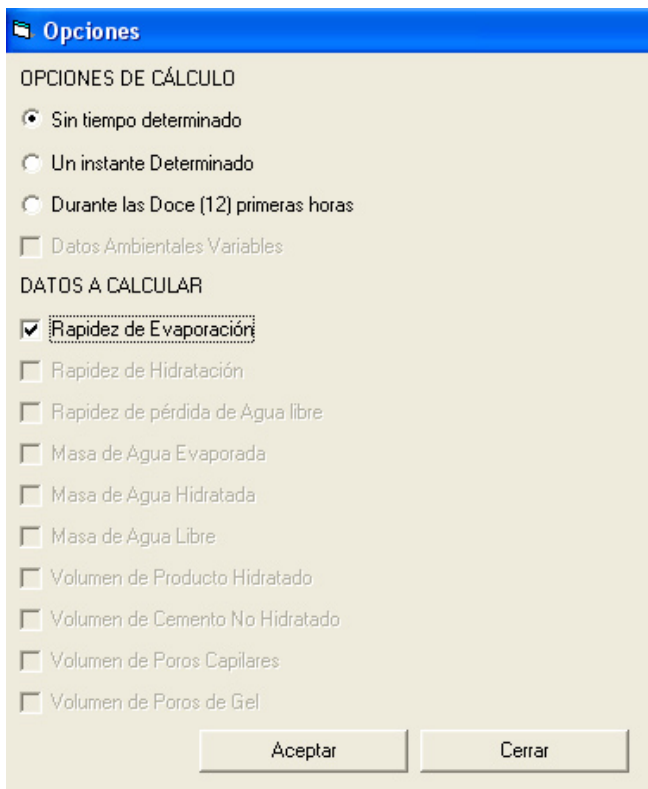


Figura 4. Módulos de cálculo programa agrietamiento por contracción plástica

El Modo 1, para operación sin tiempo determinado, permite estimar la rapidez de evaporación y la posibilidad de que se presente agrietamiento de la superficie del concreto, bajo condiciones climáticas y de temperaturas del concreto determinadas, sin considerar una condición específica del proceso de fraguado. Los datos requeridos en este modo son: temperatura del aire, humedad relativa, velocidad del viento y temperatura del concreto. Ver Figura 5.

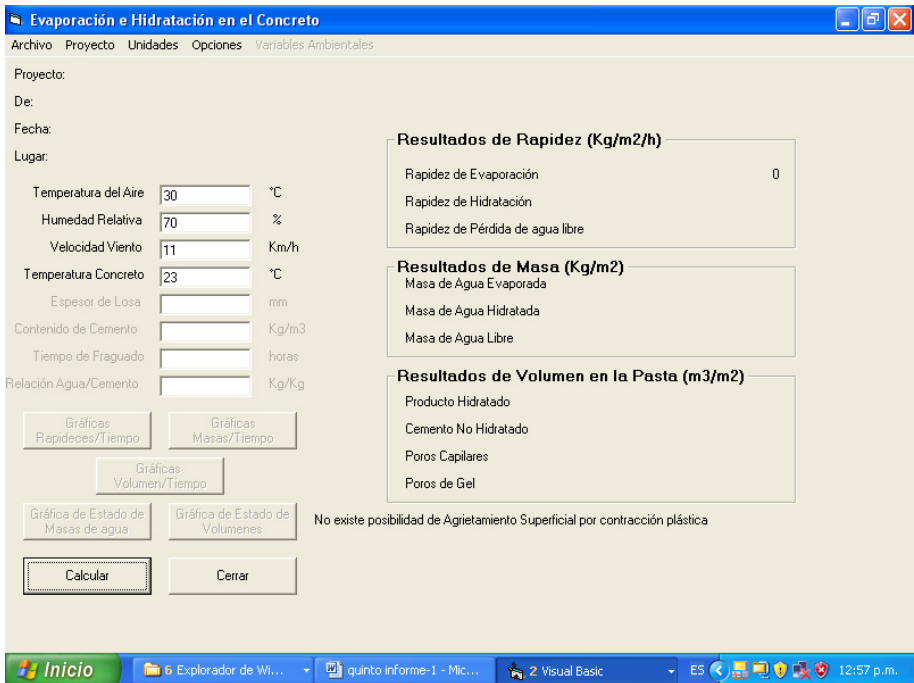


Figura 5. Modo de cálculo sin tiempo determinado

El Modo 2, para cálculo en un instante determinado, permite conocer la composición de la pasta en un momento específico del proceso de fraguado. Bajo este modo, dependiendo de las necesidades del usuario, es posible conocer no sólo la rapidez de evaporación, sino también el contenido de agua hidratada, de agua libre, el volumen de producto hidratado, no hidratado, poros de gel y poros capilares.

Para la utilización del Modo 2 se requieren los siguientes datos: temperatura del aire, humedad relativa, velocidad del viento, tiempo de fraguado, geometría del elemento que se va a elaborar, contenido de cemento por metro cúbico de concreto y la relación agua/cemento de la mezcla.

El Modo 3 realiza también las anteriores estimaciones, pero no se limita a un instante determinado, sino que las realiza para el período completo de estudio que son las doce primeras horas de fraguado. Adicionalmente, admite la utilización de datos ambientales constantes o variables en el tiempo. Esto último es más coincidente con la realidad; sin embargo, no siempre es posible contar con esta información a este nivel de detalle.

4. SIMULACIÓN DEL MODELO

El modelo fue simulado empleando los datos ambientales provenientes de la estación meteorológica de la Universidad del Norte en Barranquilla (Colombia) y corresponden a un período de 7 meses, que va desde marzo hasta septiembre de 2005.

Las variables utilizadas fueron: temperatura media horaria del aire, velocidad media horaria del viento y humedad relativa media horaria. Estos datos pueden observarse en las Figuras 6, 7 y 8.

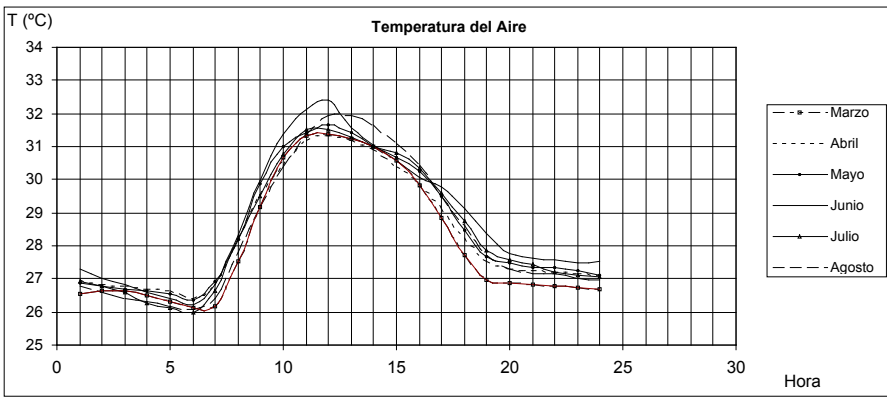


Figura 6. Comportamiento temperatura del aire marzo-septiembre 2005 Estación Meteorológica Universidad del Norte, Barranquilla (Colombia)

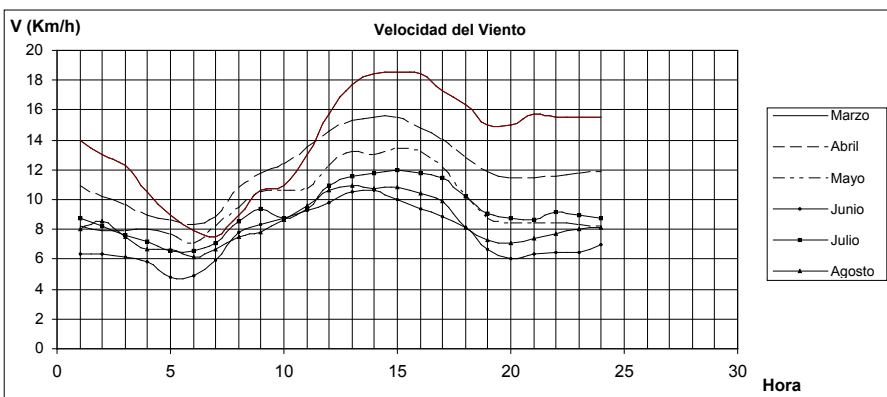


Figura 7. Comportamiento velocidad del viento marzo-septiembre 2005 Estación Meteorológica Universidad del Norte, Barranquilla (Colombia)

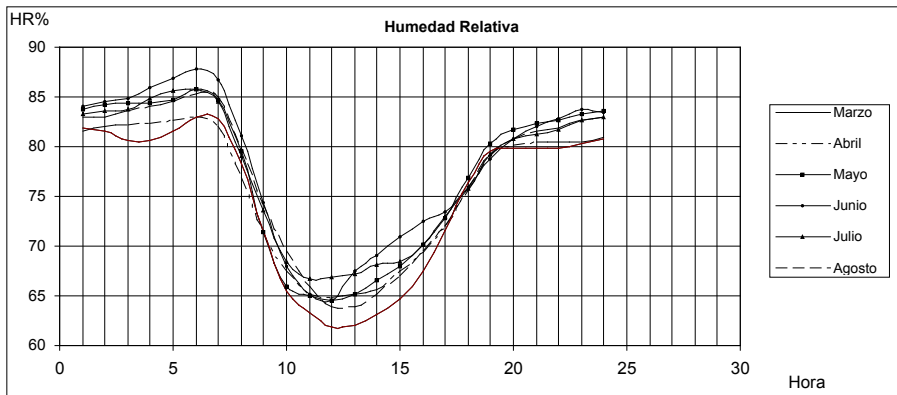


Figura 8. Comportamiento humedad relativa marzo-septiembre 2005
Estación Meteorológica Universidad del Norte, Barranquilla (Colombia)

Durante el período de estudio, la temperatura promedio horaria fue de 28.5 °C, con un valor máximo de 35.5 °C y un mínimo de 22.5 °C, mientras la humedad relativa horaria promedio fue de 76.7%, con un valor mínimo de 47.4% y un máximo de 91.2%. Por su parte, la velocidad del viento presentó un valor medio de 9.7 km/h, variando en el rango de 1.1 km/h a 22.7 km/h. En general, las condiciones anteriores se consideran propias de climas cálidos, con condiciones de humedad y de velocidades del viento altas [3].

Por otra parte, se estableció que un contenido de cemento de 180 kilogramos por metro cúbico de concreto y una relación agua/cemento de 0.5 son condiciones muy comunes en la construcción local de la ciudad de Barranquilla, por lo cual se mantuvieron fijas en todos los casos de simulación.

Teniendo en cuenta que la opción de cálculo del Modo 3 para la estimación de formación de grietas durante las primeras doce horas de fraguado, permite analizar el comportamiento completo del proceso de fraguado de la mezcla de concreto, ésta fue la opción seleccionada para validar el modelo desarrollado e implementado.

Los resultados de la simulación correspondiente al inicio del fraguado a las 11:00 am, se presentan en las Figuras 9, 10, 11 y 12. En la Figura 9 se observan los tamaños de las diferentes fases (productos hidratados, productos no hidratados, poros de gel y poros capilares) que componen a la

doceava hora de fraguado la pasta de cemento. En la Figura 10 puede verse la variación del tamaño de cada una de las anteriores fases durante las doce primeras horas de fraguado. En la Figura 11 se muestra la variación másica de todas las fases de agua de la pasta de cemento (agua libre, agua usada en hidratación y agua evaporada). Finalmente, en la Figura 12 se presenta la variación en las velocidades de evaporación, hidratación y pérdida de agua libre de la pasta de cemento. De las anteriores figuras, particularmente en las 11 y 12, se puede inferir cómo las condiciones ambientales típicas en la ciudad de Barranquilla generan una rapidez de evaporación mucho mayor que la rapidez de hidratación, lo que ocasiona que aproximadamente a la novena hora de haber fundido un elemento, éste normalmente se encuentra sin agua libre, por lo que teóricamente de este modo se detiene el proceso de hidratación.

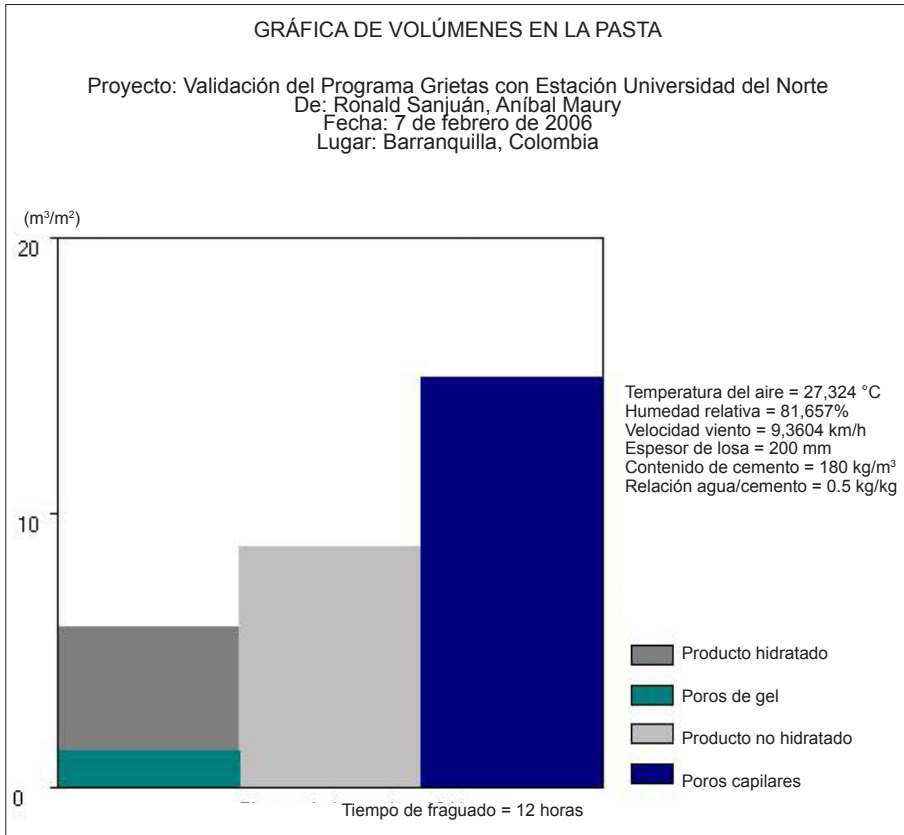


Figura 9. Composición volumétrica de la pasta de cemento.
Inicio de fraguado a las 11:00 am

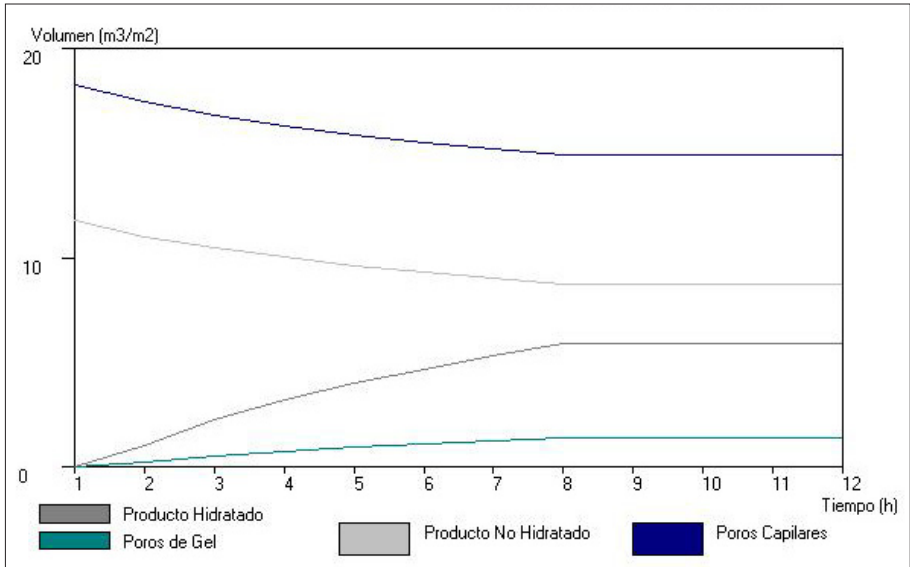


Figura 10. Variación volumétrica de la composición de la pasta de cemento. Inicio de fraguado a las 11:00 am

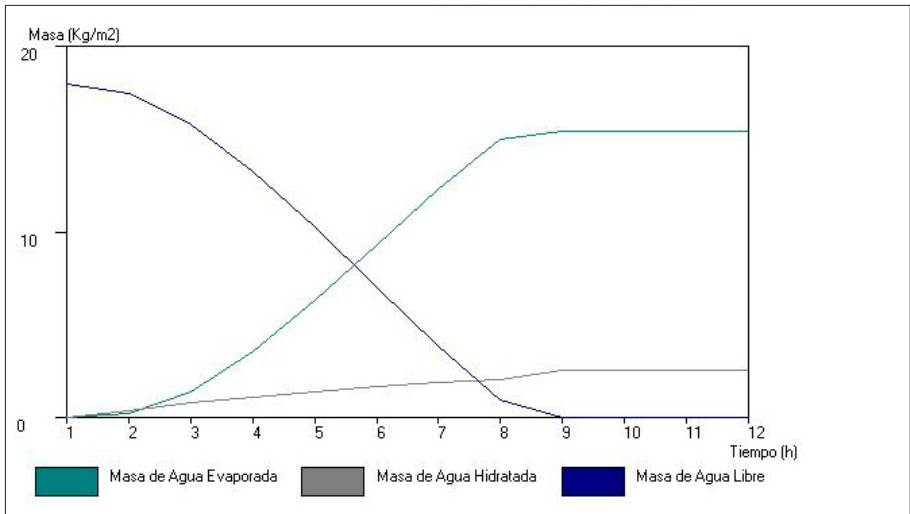


Figura 11. Variación másica del agua en la pasta de cemento. Inicio de fraguado a las 11:00 am

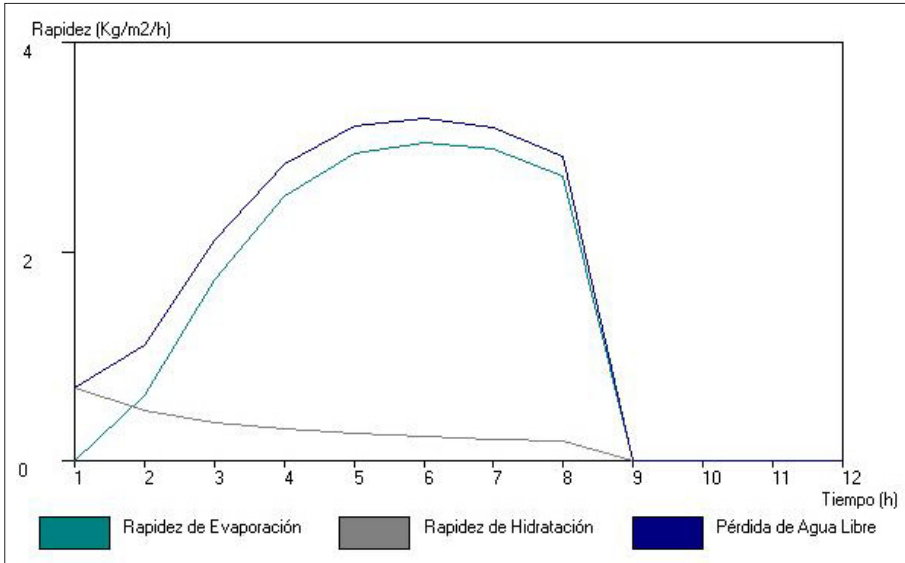


Figura 12. Variación de las rapideces de evaporación, hidratación y pérdida de agua libre en la pasta de cemento.

Sin embargo, lo que se observa en la realidad es que el proceso de hidratación continúa, ya que luego de reducirse a niveles bajos el contenido de agua libre, el cemento no hidratado comienza un lento proceso de absorción del agua presente en la atmósfera. No obstante, aunque este mecanismo de hidratación puede generarse cuando la humedad relativa del aire es alta, la calidad del concreto puede verse comprometida si no se garantiza mediante técnicas especiales de curado las condiciones para reducir la rapidez de evaporación.

5. CONCLUSIONES

Comparando los resultados obtenidos con el modelo desarrollado y los datos experimentales (ACI 305R [3]), se puede afirmar que de acuerdo con las hipótesis establecidas, el modelo permite predecir satisfactoriamente el estado de las diferentes fases del agua dentro de la mezcla considerando el fenómeno de evaporación de agua en la superficie del concreto en climas cálidos, y el proceso de hidratación durante el fraguado de la pasta.

Utilizando la incorporación de la evolución del agua hidratada en el modelo, éste predice también la composición de los demás elementos de la pasta aprovechando las formulaciones desarrolladas por Powers [6].

Mediante el criterio propuesto en la ACI 305R [3], el modelo evalúa adecuadamente la posibilidad del agrietamiento por contracción plástica en estructuras elaboradas en altas temperaturas.

Atendiendo a los resultados obtenidos en la simulación, es posible afirmar que cuando se construye con elevadas temperaturas y con la presencia de vientos fuertes (tal como es el caso de la ciudad de Barranquilla), el agua libre de un elemento con características geométricas especiales se consume en su totalidad antes de las primeras doce horas de fraguado, si en este período no se provee ningún tipo de curado para evitar el fenómeno de evaporación del agua libre en la superficie.

Considerando que el modelo permite conocer la composición de la pasta durante las primeras doce horas del fraguado y utilizando los conceptos de difusión de un líquido en un medio poroso, resultará posible estudiar la rapidez de evaporación del agua libre y el proceso de formación de grietas en posteriores investigaciones.

6. REFERENCIAS

- [1] KJELSEN, K.O., DETWILLER, R.J. Reaction kinetics of portland cement mortars hydrated at different temperatures. *Cement and Concrete Research*, Vol. 22. No. 1, 1992. p179-189.
- [2] MÖNNING, S. Modelling of concrete hydration. *Otto-Graf Journal*, Vol. 13, 2003. p219.
- [3] Hot weather concreting, ACI 305R, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI. 1991.
- [4] SCHINDLER, A. K., McCULLOUGH, B. F. The importance of concrete temperature control during concrete paving construction in hot weather conditions. Proceedings Annual meeting of the transportation research board. Washington, 2002. p15.
- [5] P. MOUNANGA, A. KHELIDJ, A. LOUKILI, *et al.* Etude experimentale du comportement thermique et du retrait endogene de pates de ciment du tres jeune age. Proceedings XXIIèmes Rencontres Universitaires de Génie Civil - Ville & Genie Civil, 2004. p1-8.
- [6] T.C. POWERS. Physical properties of cement paste. Proceedings of 4th International Symposium on the Chemistry of Cement. Washington, 1960. p577-613.