

Curado interno en hormigones de alto desempeño - un nuevo paradigma

Internal curing in high performance concretes - a new paradigm

Mauricio López*, Lawrence F. Kahn**, Kimberly E. Kurtis**

* Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, CHILE

** Georgia Institute of Technology, Atlanta, U.S.A

mlopez@ing.puc.cl

Fecha de recepción: 10/ 06/ 05

Fecha de aceptación: 15/ 07/ 05

PAG. 117 - 126

Resumen

El curado del hormigón es un requisito fundamental en la obtención de un hormigón de buena calidad. El curado asegura la hidratación de los materiales cementicios y la obtención de la resistencia requerida en el hormigón. Más aún, el curado reduce la variabilidad en las propiedades mecánicas y disminuye permeabilidad. Con la irrupción de hormigones de baja razón agua-materiales cementicios (W/CM) muchas de las propiedades del hormigón han sido mejoradas de manera importante. Sin embargo, la necesidad de curado se ha hecho más necesaria que antes. Los hormigones de baja W/CM tienen un bajo contenido de agua y relativamente altos volúmenes de materiales cementicios lo que incrementa la necesidad de agua de curado. Sin embargo, este tipo de hormigón usualmente presenta baja permeabilidad lo que dificulta el ingreso del agua de curado. Un nuevo paradigma ha surgido como respuesta a la necesidad de curado y en especial frente a la dificultad de curar los hormigones de baja W/CM. Este paradigma se llama curado interno del hormigón y consiste en almacenar agua al interior del hormigón que no está disponible durante el mezclado o en las primeras etapas de hidratación pero es liberada más tarde para el curado. Este artículo presenta los diferentes tipos y métodos de curado interno disponibles hoy en día, los mecanismos de acción de ellos y algunos resultados experimentales que demuestran su efectividad.

Palabras Clave: Grado de hidratación, propiedades mecánicas, microestructura, retracción, creep

Abstract

In the making a good quality concrete, curing represents one of the most important factors to be considered. Curing allows the cementitious materials to hydrate and the concrete to reach the specified strength. Moreover, it reduces the variability in the mechanical properties and decreases permeability. Since the development of low water-to-cementitious materials ratio (W/CM) concretes, several properties of concrete have been greatly improved. Nevertheless, the need of curing has become even more important. A low W/CM concrete has low water content and relatively high amount of cementitious materials which increases the need for curing. However, this kind of concrete has low permeability which makes difficult the ingress of curing water. A new paradigm has emerged for solving the curing needs of low W/CM concretes. This paradigm is called internal curing, and it consists of storing water within the concrete that is not available during the mixing nor during the first stages of hydration but it is released for curing later on. This paper presents the different types and methods of internal curing currently available, the working principles and some experimental results that demonstrate its effectiveness.

Keywords: Degree of hydration, mechanical properties, microstructure, shrinkage, creep

1. Introducción

El agua está presente durante todo el ciclo de vida del hormigón. Empieza durante el mezclado, continúa durante el curado y se perpetúa durante el servicio ya sea voluntariamente (canales presas, etc.) o involuntariamente en la forma de precipitaciones o contacto con cuerpos de agua.

1.1 Diferentes tipos de agua en el hormigón

1.1.1 Agua de mezclado

El comité 116 del American Concrete Institute

(ACI-116) define agua de mezclado como el agua presente en concreto, mortero o grout en estado fresco en adición a cualquier agua absorbida por el agregado. Esta agua primero llena los espacios entre las partículas sólidas (materiales cementicios, y agregados) y después crea una película entre ellas que las separa. Este último efecto lubricante es lo que hace una mezcla trabajable (Mindess et al., 2003).

1.1.2 Agua de hidratación

Una vez que el agua de mezclado y los materiales cementicios entran en contacto, diferentes reacciones químicas se llevan a cabo. El agua que era originalmente agua de mezclado se transforma en diferentes tipos de agua a medida que la hidratación ocurre. Parte del agua pasa a estar químicamente combinada en el principal compuesto que otorga resistencia al hormigón, silicatos de calcio hidratados. Otra parte del agua es adsorbida en la superficie de los productos de hidratación y la otra parte queda atrapada en los poros capilares originados durante la hidratación.

Dichos capilares se forman debido a que el volumen de los productos de hidratación es menor que el volumen de los materiales previos a la hidratación (Neville, 2003).

1.1.3 Agua de curado

Según Neville (1996), el objetivo del agua de curado es mantener el hormigón en condición saturada de manera que los espacios originalmente llenos de agua se llenen de productos de hidratación. Si dicha agua no está presente, se detiene la hidratación dejando excesiva porosidad que reduce las propiedades mecánicas y durabilidad del hormigón.

1.1.4 Agua de servicio

En la mayoría de los casos el hormigón estará expuesto a agua durante su vida útil, ya sea porque es parte de estructuras para el manejo y distribución de agua (presas, canales, tuberías) o porque está expuesto al ambiente donde agua de precipitaciones, subterráneas y superficiales entrarán en contacto con el hormigón.

1.2 Necesidad de curado

Mehta y Monteiro (1993) definen curado como todos aquellos procedimientos para promover la hidratación del cemento los que consisten en manejo del tiempo, de la temperatura y la humedad inmediatamente después de la colocación del hormigón.

El curado es necesario no sólo para alcanzar la resistencia requerida sino para alcanzar el óptimo en todas las propiedades del hormigón. Se requiere de un adecuado suministro de humedad para asegurar la hidratación de los materiales cementicios, reducir así la porosidad y maximizar las propiedades mecánicas y durabilidad (Mindess et al., 2003).

Powers (1947) demostró que si la humedad relativa en los capilares baja de 80%, la hidratación se detiene. Esto implicaría que si las condiciones de humedad

relativa del ambiente son mayores a 80 % no habría necesidad de suministro de agua externamente. Neville (1996) concluye que en la práctica debido al viento, diferencias en temperatura y otros, siempre habrá migración de humedad desde el hormigón hacia el ambiente, por lo que "curado natural" no existe.

Kosmatka et al., (2002) concluyen que el agua de mezclado en hormigones convencionales es usualmente mayor que el agua requerida para la hidratación del cemento. Sin embargo, pérdidas de agua desde el hormigón al ambiente pueden retrasar o incluso detener la hidratación. La Figura 1 es presentada por Kosmatka et al., (2002) como una evidencia empírica del efecto del suministro externo de agua de curado en la resistencia a compresión del hormigón.

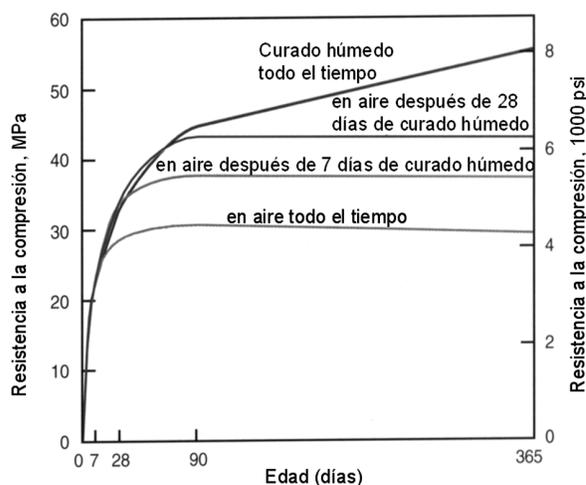


Figura 1. Efecto del tiempo de curado en la resistencia del hormigón (Kosmatka et al., 2002).

1.3 Curado en hormigones de alto desempeño

Con el fin de desarrollar hormigones de características especiales, hoy en día la tecnología del hormigón presenta muchas variaciones a los sistemas convencionales de cemento portland, agua y agregados.

Ingredientes como las cenizas volantes, la escoria granulada de alto horno, microsilica, puzolanas naturales, aditivos químicos reductores de agua, fibras y agregados artificiales entre otros, son utilizados de manera regular y no constituyen aplicaciones especiales (Mehta y Monteiro, 1993; Neville, 1996; Kosmatka et al., 2002; Mindess et al., 2003).

Según Aïtcin (1998) el principal factor que ha permitido el desarrollo de los hormigones de alta resistencia y alto desempeño es el desarrollo de aditivos

reductores de agua de alto rango. Con estos se ha posibilitado el empleo de razones agua-materiales cementicios (W/CM) muy bajas (menor a 0.35) lo que trae consigo el mejoramiento no sólo de la resistencia a compresión sino de otras propiedades como el módulo de elasticidad, resistencia a la flexión, permeabilidad y resistencia a la abrasión.

Este tipo de hormigones, tan diferente de los denominados hormigones convencionales, ha producido un nuevo escenario respecto al rol y necesidad de curado.

Cenizas volantes, escoria granulada de alto horno, puzolanas naturales, y microsilica son sólo algunos de los materiales cementicios suplementarios que se pueden utilizar en el hormigón (ACI-232, 1996; ACI-232, 2000; ACI-233, 1995; ACI-234, 1996). La mayoría de ellos se caracterizan por presentar una reacción puzolánica con el hidróxido de calcio (portlandita) generando mayor cantidad de silicatos de calcio hidratados. Con excepción de la microsilica, la reacción con el hidróxido de calcio toma tiempo y la evolución de la resistencia de este tipo de hormigones es usualmente más lenta. Tanto Malhotra y Mehta (2005) como Ayers y Khan (1993), enfatizan que el curado en este tipo de sistema debe prolongarse por más tiempo de manera de asegurar que estas reacciones “secundarias” se lleven a cabo. La microsilica, por otro lado, promueve un refinamiento de la porosidad y presenta una alta retracción durante la hidratación (retracción química). Ambos efectos promueven el secado autógeno el cual requiere de agua para ser prevenido (Ayers y Khan, 1993; Jensen y Hansen, 2001a)

Por otro lado, hormigones con W/CM menores a 0.35 posiblemente no contienen suficiente agua para la hidratación de la totalidad de los materiales cementicios presentes. Por lo tanto, incluso si no se considera pérdida alguna de agua desde el hormigón al ambiente, todavía no es posible alcanzar un grado de hidratación teórico de 100 %.

En adicción a lo anterior, los hormigones de alto desempeño tienen por lo general una baja permeabilidad, lo que dificulta el ingreso del agua de curado. Esto significa que incluso manteniendo buenas practicas de curado, el agua no es capaz de alcanzar los materiales cementicios, y por lo tanto no se genera nuevos productos de hidratación (Aïtcin, 1998).

Shah y Ahmad (1994), reportaron resultados contradictorios con respecto al curado en hormigones de alto desempeño. Algunos autores obtuvieron resistencia a compresión a los 28 días 10% menores en hormigones curados por sólo 7 días con respecto a hormigones curados por 28 días (Carrasquillo et al., 1981). Por otro lado,

otros artículos han concluido que si se cuenta con un buen curado durante los 7 primeros días, las condiciones de humedad y temperatura entre 7 y 28 días no afectan la resistencia a compresión a 28 días significativamente (Peterman y Carrasquillo, 1986). Lo anterior puede deberse a la baja permeabilidad alcanzada por este tipo de hormigones, lo que hace que después de 7 días de curado la permeabilidad sea lo suficientemente baja para prevenir pérdida de agua al ambiente o ingreso de agua desde el ambiente.

Aïtcin y Neville (1993), también llegaron a la conclusión de que hay controversia en la necesidad de curado en hormigones de alto desempeño. Ellos mencionan artículos que recomiendan seguir el mismo tipo de curado que hormigones convencionales y otros que dicen que el curado no es necesario. Sin embargo, Aïtcin (1998) sostuvo que el curado es aún más importante en hormigón de alto desempeño que en hormigón convencional. En hormigones de alto desempeño el curado debe comenzar a edades muy tempranas de manera de prevenir el “secado autógeno”. Después que el fraguado final ha ocurrido, la reacción de hidratación continúa al interior del “esqueleto poroso”, lo que origina una disminución del agua al interior de los poros. Esto se denomina “secado autógeno” y comienza a ocurrir desde edades muy tempranas si no se provee agua adicional.

1.4 Secado autógeno y retracción autógena

Jensen y Hansen (2001a) en un excelente análisis del secado y retracción autógenos, concluyeron que los hormigones de alta resistencia / alto desempeño son considerablemente diferentes de los hormigones convencionales debido principalmente a: (a) el uso de bajas W/CM, en conjunto con (b) el uso de microsilica que da origen a un refinamiento de la estructura de los poros, y (c) las reacciones cementicias son muy sensibles a la humedad relativa dentro del hormigón.

Si se considera que el bajo contenido de agua presente en la mezcla es utilizado rápidamente, la humedad relativa dentro del hormigón cae de manera abrupta en las primeras horas después de mezclado. Eso no sólo puede detener la reacción de hidratación sino además dar origen a fuerzas capilares que producen retracción del hormigón. Este fenómeno es conocido como retracción autógena (Neville, 1996; Mindess et al., 2003; Aïtcin, 1998; Shah y Ahmad, 1994). Jensen y Hansen (2001a) reportaron valores de retracción autógena durante las dos primeras semanas en pastas de cemento de baja W/CM, de hasta $1000\mu\epsilon$ ($\text{mm} / \text{mm} \times 10^{-6}$). Con

esto potencialmente grandes cambios volumétricos ocurren cuando el hormigón aún no ha desarrollado la totalidad de su resistencia. Si dichos cambios volumétricos ocurren en conjunto con contracciones térmicas, se puede originar agrietamiento fácilmente (Jensen y Hansen 2001b).

Neville (2003) concluyó que la retracción autógena al igual que la retracción hidráulica, se origina por la pérdida de agua desde la pasta de cemento hidratada. La diferencia entre ellas es que la pérdida en la retracción autógena es debido al uso del agua en la hidratación del cemento en lugar de pérdida al ambiente.

2. Filosofía del curado interno

2.1 Modelo de powers

Powers (1947) desarrolló un simple grupo de ecuaciones empíricas para modelar las diferentes fases presentes en un sistema que contiene cemento portland y agua. En su modelo Powers define 5 entidades: (a) cemento sin hidratar, (b) agua, (c) productos de hidratación, (d) porosidad de los productos de hidratación y (e) porosidad capilar. El volumen ocupado por cada una de estas fases depende del grado de hidratación del cemento. Por ejemplo para un grado de hidratación igual a cero, hay solamente cemento y agua, y su volumen está dado por el volumen de cada uno de ellos adicionado originalmente. Para un grado de hidratación completo (100 %), el volumen de cemento es cero, y el volumen de productos de hidratación es aproximadamente 0.68 cm^3 por gramo de cemento originalmente adicionado y el volumen de porosidad (en los productos de hidratación y capilares) está dado por la razón agua - cemento (W/C). Dicha razón determina el espaciamiento inicial entre las partículas de cemento y por lo tanto el espaciamiento dentro de la pasta de cemento (porosidad) después de que el cemento se ha hidratado.

La formación de los silicatos de calcio hidratados y del hidróxido de calcio puede llevarse a cabo sólo si se reúnen dos requisitos: (a) si hay suficiente espacio para que los productos de hidratación se formen y (b) si hay suficiente agua para ser usada durante la hidratación (Mindess et al., 2003).

El espacio disponible para los productos de hidratación disminuye a medida que la hidratación progresa, en este sentido se puede alcanzar cierto punto donde el espacio no es suficiente para continuar la hidratación. Utilizando las ecuaciones propuestas por Powers, se puede demostrar que esto ocurre para W/C bajo 0.36. Como consecuencia, en sistemas bajo ese

límite no ocurrirá hidratación completa, incluso entregando agua externamente. Cuando la W/C está ligeramente sobre 0.36, si bien se tiene espacio suficiente para los productos de hidratación, no se cuenta con el agua suficiente para hidratarlos. En un sistema cerrado en el que no se pierde agua al ambiente ni se recibe agua desde el ambiente, la W/C debe ser mayor a 0.42 para poder alcanzar una hidratación del 100 % (Mindess et al., 2003).

Basado en lo anterior cualquier sistema con W/C entre 0.36 y 0.42 requiere de agua adicional para alcanzar el 100 % de hidratación. De la misma manera, mezclas con W/C menores a 0.36 requieren del suministro de agua externa para alcanzar el máximo grado de hidratación que no será 100 % por no contar con el espacio suficiente.

Todo lo anterior se concluye asumiendo que no hay pérdidas de agua por evaporación al ambiente. En realidad puede haber pérdidas importantes al ambiente debido a diferencias en temperatura, viento, diferencias en humedad relativa, y radiación solar (Neville, 1996). Tomando en cuenta dichas pérdidas, se requiere suplir aún una mayor cantidad de agua para alcanzar el máximo grado de hidratación.

Si bien las ecuaciones desarrolladas en el modelo de Powers se aplican sólo a sistemas de cemento portland y agua, las conclusiones respecto a la necesidad de agua de curado pueden ser extendidas a sistemas más complejos.

2.2 Principios del curado interno

Dada la importancia del agua de curado y la dificultad de proveerla desde el exterior en hormigones de alto desempeño, la idea de proveer agua desde el interior del hormigón cobra una especial importancia (Weber y Reinhardt, 1997).

A partir del Modelo de Powers se concluye que a menor W/C, menor es la porosidad capilar. Por otro lado, del mismo modelo se puede observar que a W/C bajas puede no existir suficiente agua para hidratar todo el cemento. De lo anterior se tiene que al momento de mezclado se requiere de una W/C lo más baja posible, pero al cabo de un tiempo cuando el agua se ha acabado se requiere de agua adicional para continuar con la hidratación (Bentz y Snyder, 1999; Jensen y Hansen, 2001b).

Así, el principio fundamental del curado interno es el incorporar agua en la mezcla que no está disponible para la hidratación al comienzo (baja W/C), pero que es

liberada más tarde cuando es requerida para continuar la hidratación.

Bentz y Snyder (1999) destacaron la importancia de una aplicación del curado interno de manera homogénea. No es suficiente el contar con el agua al interior del hormigón sino que ésta debe encontrarse disponible para la hidratación. La mayoría de los granos de materiales cementicios deben estar cercanos a la fuente de almacenamiento de agua ya que la distancia de viaje del agua es muy variable.

Lura et al., (2003) midieron desplazamiento de agua desde la fuente de almacenamiento de hasta 4 mm en mezclas de W/C de 0.3. Sin embargo, ellos concluyeron que el transporte de agua dentro del hormigón está afectado por factores como: (a) permeabilidad de la mezcla, la cual se reduce a medida que la hidratación continúa; (b) W/C y; (c) uso de microsíllica u otros materiales cementicios. La distancia de viaje del agua dentro del hormigón puede ser entonces reducida a los niveles reportados por Bentz y Snyder (1999) de tan sólo 0.1 a 0.2 mm.

Independiente del método utilizado para almacenar agua dentro del hormigón, el mecanismo de liberación de ella es básicamente el mismo. Weber y Reinhardt (1997) y Holm et al., (2003) explicaron que a medida que la hidratación del cemento procede, un sistema de porosidad capilar se forma en la pasta de cemento. El radio de estos poros y la humedad relativa al interior de ellos disminuyen a medida que más productos de hidratación se forman, llegando un cierto punto en que estos poros son capaces de absorber agua de la fuente de almacenamiento por acción capilar. A medida que más hidratación ocurre y los poros se hacen más finos dicha fuerza capilar aumenta siendo capaz de succionar más agua de la fuente. Este proceso se detiene cuando el agua de la fuente se ha agotado o cuando la totalidad del cemento de ha hidratado o si la permeabilidad de la pasta es muy baja y no permite el transporte de agua.

2.3 Métodos para incorporar agua en el hormigón

En la sección anterior se explica el mecanismo del curado interno. Ahora, se revisan diferentes métodos de incorporar el agua dentro del hormigón.

De acuerdo con Bentz y Snyder (1999), Philleo fue el primero en sugerir la idea de curado interno en 1991, mediante el uso de agregado liviano. Desde entonces, diversos autores han estudiado el uso de agregado liviano como método de incorporar agua en el hormigón (Weber y Reinhardt, 1997; Khono et al., 1999; Bentz y Snyder, 1999; Bentur et al., 2001; Zhutovsky et

al., 2002; Lura et al., 2003; Hoff, 2003; Holm et al., 2003; López et al., 2006). Estos autores han explorado el uso de agregado liviano natural y artificial, agregado liviano fino y grueso, y el reemplazo parcial o total de agregado normal por agregado liviano. En todos estos estudios se ha demostrado un alto grado de efectividad en el curado interno usando agregados livianos. Debido a su estructura porosa, los agregados livianos pueden presentar una absorción después de 24 horas de inmersión entre 5 a más 25 % (Holm y Bremner, 2000), ello permite la incorporación de altas cantidades de agua para curado interno. La cantidad de agua incorporada depende de la absorción y cantidad de agregados liviano, ésta puede alcanzar valores de 60 l/m³ de hormigón (Holm et al., 2003) y de hasta 190 l/m³ si se utiliza agregado fino y grueso de alta absorción (Jensen y Lura, 2003).

El agua busca espontáneamente niveles de energía más bajos; por ello en el hormigón el agua se mueve desde los poros más grandes a los más pequeños. Como consecuencia, los poros de mayor diámetro son los primeros en vaciarse continuando con poros cada vez más pequeños. Cuando un cierto límite en el diámetro de los poros es alcanzado, el agua se encuentra en niveles suficientemente bajos de energía y no es cedida. Según Jensen y Lura (2003), dicho límite es aproximadamente 0.1 µm y por lo tanto poros de menos tamaño no contribuyen al curado interno.

Una de las posibles desventajas de reemplazar agregado normal por liviano es que la resistencia y módulo de elasticidad del hormigón disminuyen (ACI-213, 2003; Aïtcin, 1997; Shah y Ahmad, 1994; Holm y Bremner, 2000). Los polímeros súper absorbentes surgen así como una alternativa a los agregados livianos como agente incorporador de agua (Jensen y Hansen 2001b, 2002).

Hay una gran variedad de polímeros súper absorbentes, ellos pueden absorber hasta 5000 veces su peso en agua dependiendo de su estructura. Sin embargo, la mayor cantidad de estos polímeros es actualmente utilizada en pañales desechables donde alcanzan absorciones de alrededor 50 veces su peso en agua (5000 %). Estos polímeros se incorporan en estado seco a la mezcla como un aditivo más. Su tamaño promedio en estado seco puede estar entre 0.1 y 0.25 mm lo que puede aumentar hasta 3 veces después que han absorbido el agua (Jensen y Hansen 2002). Una vez que el polímero súper absorbente ha entregado el agua a la pasta cementicia, deja una porosidad que según Jensen y Hansen (2003), puede ser comparada a la porosidad de un aditivo incorporador de aire. La principal ventaja que

estos polímeros presentan por sobre los agregados livianos es la mayor absorción que resulta en el uso de menores cantidades en el hormigón para incorporar el mismo volumen de agua de curado. Por otro lado, los polímeros súper absorbentes pueden presentar problemas de segregación debido a su baja densidad (Jensen y Hansen, 2002). Otro problema es que su absorción en presencia de los materiales cementicios puede ser menor a la esperada incrementando la W/C en la mezcla. Lo anterior puede en parte explicar la reducción en resistencia a compresión de 19 % medida por Jensen y Hansen (2002) en sus mezclas cuando se utilizó polímeros súper absorbentes para curado interno.

Otros métodos como el uso de elementos orgánicos naturales de alta capacidad de absorción pueden ser otra forma de proveer el curado interno. Fibras de celulosa, como las utilizadas en la manufactura del papel, pueden proveer curado interno al mismo tiempo de servir de refuerzo para el hormigón (Mohr et al., 2005). La tierra diatomácea, compuesta de esqueletos de organismos unicelulares fosilizados, posee una alta absorción. Un potencial problema de estas últimas es que la demanda de agua para mantener una buena trabajabilidad puede aumentar debido a su forma angulada (Jensen y Lura, 2003).

3. Efectos del curado interno

Los efectos del curado interno en las propiedades del hormigón derivan del aumento en el grado de hidratación alcanzado por los materiales cementicios. Esto produce un aumento en las propiedades mecánicas, disminución en la permeabilidad y reducción en las deformaciones de largo plazo como retracción y creep¹.

3.1 Efectos en resistencia a compresión

Weber y Reinhardt (1997) investigaron el curado interno un una mezcla de hormigón de alta resistencia. La mezcla consideró una W/CM de 0.3 y un 10 % de microsilica. Además una fracción del agregado fino fue reemplazada por agregado liviano saturado de manera de aplicar un curado interno. Se comparó la resistencia de probetas sometidas a tres regímenes de curado: (a) selladas inmediatamente después de desmoldar, (b) mantenidas bajo condiciones de secado después de desmoldar, y (c) curadas inmersas en agua por 6 días después de desmoldar. Al cabo de un año las diferencias en resistencia a compresión fueron del orden del 3 % lo que demuestra que el efecto del curado externo no es

significativo si se cuenta con un adecuado curado interno. López et al., (2006), compararon la resistencia entre dos hormigones livianos de alta resistencia, uno con curado interno y el otro sin. Las mezclas consideraron una W/CM de 0.23, cemento de alta resistencia temprana, microsilica y ceniza volante. Se consideró además dos tipos de agregado, arena silicea como agregado fino y pizarra expandida como agregado liviano grueso. Con el objetivo de medir el efecto del curado interno, una de las mezclas utilizó el agregado liviano en condición saturada para proveer curado interno mientras que la otra utilizó el agregado en condición seca al aire. La mezcla que recibió el curado interno presentó una resistencia 1 y 12 % mayor que la mezcla sin curado interno para las edades de uno y 365 días, respectivamente. Esto quiere decir que a la edad de un día cuando las probetas fueron recién desmoldadas, la diferencia entre las dos mezclas fue despreciable, pero al cabo de un año las probetas que recibieron curado interno alcanzaron una resistencia a compresión considerablemente mayor.

3.2 Efectos en porosidad

Weber y Reinhardt (1997) midieron el cambio de la porosidad en hormigones de alta resistencia sometidos a curado interno. Ellos concluyeron que a pesar de no contar con ningún tipo de curado externo, la porosidad total se redujo entre 180 y 365 días, demostrando un aumento en el grado de hidratación. Ellos además observaron que los poros de mayor diámetro disminuyeron y los de menor diámetro aumentaron, lo que implica una disminución en el tamaño promedio de los poros y la consiguiente disminución de la permeabilidad del hormigón.

3.3 Efectos en retracción autógena

Una de las principales ventajas del uso de curado interno en hormigones de alta resistencia es la reducción o eliminación del secado y retracción autógenas. Varios autores han investigado el uso de diferentes métodos de curado interno en la retracción autógena (Khono et al., 1999; Bentz y Snyder, 1999; Bentur et al., 2001; Jensen y Hansen 2002; Zhutovsky et al., 2002).

Todos concluyeron que las mezclas con agregado liviano saturado o polímeros súper absorbentes presentaron considerablemente menos retracción autógena que las contrapartes sin curado interno. En algunos casos la retracción autógena fue completamente eliminada (Jensen y Hansen, 2002; Bentur et al., 2001) como se

¹Creep, en ocasiones traducido como flujo o fluencia lenta, se refiere a las deformaciones ocurridas a través del tiempo bajo carga sostenida en adición a las deformaciones elásticas instantáneas.

muestra en la Figura 2.

La disminución o eliminación de la retracción autógena se debe a que la fuente del curado interno no permite que la humedad relativa decazca en el sistema de poros. Cuando los poros comienzan a secarse, nueva agua proveniente de la fuente de curado interno los mantiene saturados.

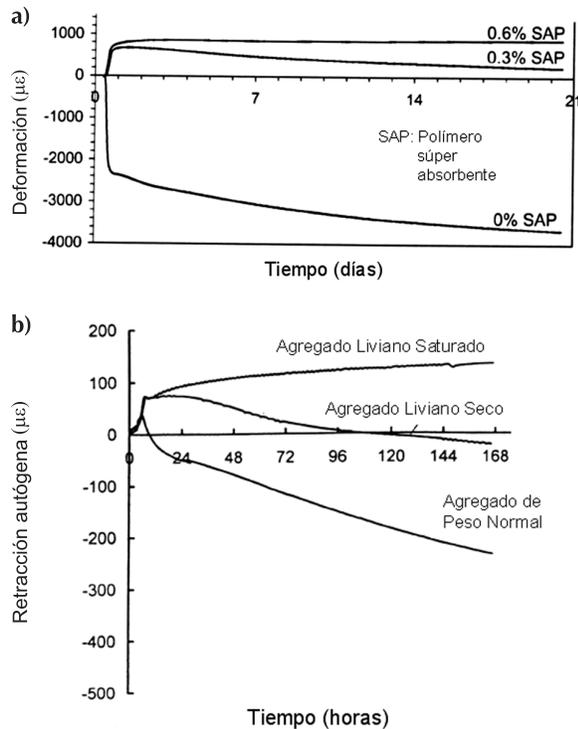


Figura 2. Efecto del curado interno en la retracción autógena en (a) Pasta de cemento (Jensen y Hansen, 2002) y en (b) Hormigón (Bentur et al., 2001)

Cabe destacar que las mezclas sometidas a curado interno mostradas en la Figura 2, no sólo no demostraron retracción autógena sino que experimentaron expansión. Esto puede actuar como una “reserva” de deformaciones cuando las mezclas están sometidas a retracción hidráulica y/o creep. Dichas deformaciones tendrán primero que contrarrestar la expansión producida por curado interno antes de causar acortamiento aparente en el hormigón.

3.4 Efecto en agrietamiento

Algunos autores han investigado el efecto del curado interno en la tendencia al agrietamiento. Dicha susceptibilidad se mide en probetas bajo retracción restringida. Cuando la probeta intenta contraerse, un sistema externo impide dicha deformación. Como resultado la probeta desarrolla tensiones de tracción que

una vez que superan la resistencia de la probeta, se produce rotura en forma de agrietamiento.

Jensen y Hansen (2002) realizaron pruebas de retracción restringida en morteros con y sin curado interno. Los resultados de Jensen y Hansen son presentados en la Figura 3a. La probeta de mortero sin curado interno se agrietó después de sólo 3.5 días bajo retracción autógena con una tensión equivalente a 1.5 MPa en tracción. La probeta con polímero súper absorbente (0.6 % del peso de cemento) no sólo no se agrietó en 20 días de monitoreo sino que además alcanzó una tracción de solamente 0.1 MPa.

Bentur et al., (2001) compararon la tendencia a agrietamiento de diferentes mezclas de hormigón de alta resistencia de W/CM de 0.33 con microsilica. Una de las mezclas consideró sólo agregado de peso normal (fracciones gruesa y fina) y otras dos el total reemplazo del agregado grueso por arcilla expandida. La primera de las mezclas con agregado liviano utilizó el agregado en condición saturada y la otra en condición seca al aire. La Figura 3b muestra los resultados de Bentur et al., (2001). La mezcla con agregado normal y por lo tanto sin curado interno falló bajo una tracción de aproximadamente 3 MPa después de seis días. Ninguna de las mezclas con agregado liviano se agrietó en el período de monitoreo de siete días. Las mezclas con agregado liviano en estado saturado y seco desarrollaron tracción de 0.7 MPa y compresión de 0.15 MPa, respectivamente, lo que está lejos del valor de falla medido en la probeta con agregado normal.

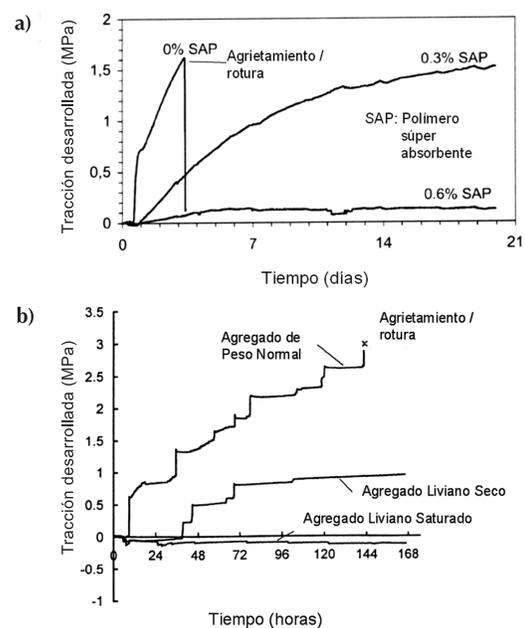


Figura 3. Efecto del curado interno en la susceptibilidad de agrietamiento en (a) morteros (Jensen y Hansen, 2002) y (b) hormigones (Bentur et al., 2001)

3.5 Efectos en Creep

López et al., (2006) compararon el efecto del curado interno en el creep de dos mezclas de hormigón liviano de alta resistencia. Los hormigones, como se menciona anteriormente, consideraron el mismo diseño de mezcla con la única diferencia en el estado de humedad del agregado liviano. Una de ellas usó el agregado liviano en condición saturada y el otro en condición seca al aire. La Figura 4 presenta los resultados de creep bajo una carga de compresión a 30 MPa.

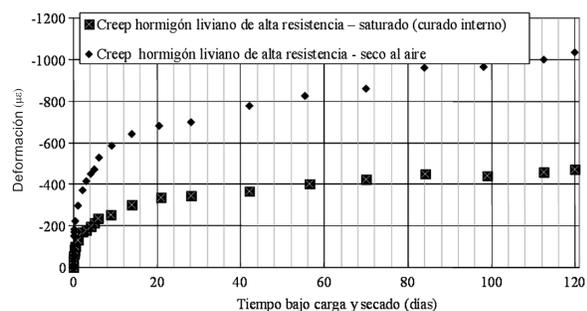


Figura 4. Efecto del curado interno en creep en probetas ensayadas a 24 horas de edad (López et al., 2006)

Las probetas provienen de tres diferentes amasadas y la carga fue aplicada a la edad de 24 horas. La figura claramente muestra que las probetas con el agregado en condición saturada desarrollaron considerablemente menos creep que sus contrapartes sin curado interno. El curado interno redujo el creep después de 120 días de 1035 $\mu\epsilon$ a sólo 470 $\mu\epsilon$. Más aún, la tasa de desarrollo de creep es más alta para las probetas sin curado interno, lo que implica que la diferencia en creep medida a 120 días continuará aumentando en el largo plazo.

4. Conclusiones

Los hormigones de alta resistencia y alto desempeño están siendo utilizados cada día con mayor frecuencia. En su mayoría estos hormigones consideran el uso de W/CM menores a 0.35. Según el modelo de Powers dichas mezclas presentan una porosidad muy baja, pero no contienen suficiente agua para hidratar la totalidad de los materiales cementicios adicionados. Para ello, en este tipo de hormigones el curado interno es incluso más necesario que en los hormigones convencionales. Una vez que el agua al interior del hormigón comienza

a acabarse, la humedad relativa interna disminuye deteniendo la hidratación y desarrollando fuerzas capilares que generan retracción autógena. La retracción autógena se desarrolla rápido (dentro de las primeras dos semanas) y cuando el hormigón no ha alcanzado aún una alta resistencia a la tracción. Lo anterior puede derivar en agrietamiento y reducción de la durabilidad de la estructura.

En adición, los métodos de curado tradicionales, donde el agua se suple desde el exterior, resultan poco eficaces dada la baja permeabilidad de estos hormigones. Como resultado la retracción autógena y agrietamiento son difíciles de evitar incluso con el empleo simultáneo de diversas técnicas tradicionales de curado. Una solución a este problema la constituye el uso de agentes incorporadores de agua en el hormigón. Dichos agentes almacenan el agua en un comienzo por lo que la W/CM permanece inalterada. Una vez que la humedad relativa dentro del hormigón disminuye, estos comienzan a liberar agua de curado. Si el agente está homogéneamente distribuido y su capacidad de retener agua es suficiente, el agua de curado puede incrementar el grado de hidratación de manera uniforme dentro del hormigón.

El uso de agregados livianos constituye hoy en día el principal agente de incorporación de agua. Los polímeros súper absorbentes también han demostrado ser eficaces en proveer un curado interno.

El curado interno promueve la hidratación de los materiales cementicios lo que a su vez mejora las propiedades mecánicas del hormigón (López et al., 2006) y disminuye la porosidad (Bentz y Snyder, 2001). En adición, el curado interno evita el secado autógeno y la retracción autógena (Khono et al., 1999; Bentz y Snyder, 1999; Bentur et al., 2001; Jensen Hansen 2002; Zhutovsky et al., 2002). Consecuentemente, la susceptibilidad al agrietamiento también se reduce (Jensen y Hansen, 2002, Bentur et al., 2001). Finalmente, el creep se ve reducido considerablemente, en especial cuando la edad de carga es temprana y no hay ningún otro tipo de curado aplicado (López et al., 2006).

Potenciales problemas con el uso de agentes incorporadores de agua para el curado interno, dependen del tipo particular y cantidad de agente que se piensa utilizar. Algunos de los potenciales efectos a considerar son durante el mezclado, en la trabajabilidad, en el tiempo de fraguado y en las propiedades mecánicas.

5. Referencias

- ACI-Committee-232 (1996), "Use of Fly Ash in Concrete", in ACI Manual of Concrete Practice. American Concrete Institute: Farmington Hills, MI.
- ACI-Committee-232 (2000), "Use of Raw or Processed Natural Pozzolans in Concrete", in ACI Manual of Concrete Practice. American Concrete Institute: Farmington Hills, MI.
- ACI-Committee-233 (1995), "Ground Granulated Blast-Furnace Slag as a Cementitious Constituent in Concrete", in ACI Manual of Concrete Practice. American Concrete Institute: Farmington Hills, MI.
- ACI-Committee-234 (1996), "Guide for the Use of Silica Fume in Concrete", in ACI Manual of Concrete Practice. American Concrete Institute: Farmington Hills, MI.
- ACI-Committee-116 (2000), "Cement and Concrete Terminology", in ACI Manual of Concrete Practice. American Concrete Institute: Farmington Hills, MI. p. 73.
- ACI-Committee-213 (2003), "Guide for Structural Lightweight-Aggregate Concrete", in ACI Manual of Concrete Practice. American Concrete Institute: Farmington Hills, MI. p. 213R.1-231R.38.
- Aïtcin P.-C. y Neville A.M. (1993), "High-Performance Concrete Demystified". *Concrete International*, 15: p. 21-26.
- Aïtcin P.-C. (1998), *High-Performance Concrete*. First ed. Modern Concrete Technology, ed. E.F. Spon. Vol. 5: E & FN Spon, 592.
- Ayers M.E. y Khan M.S. (1993), "Overview of Fly Ash and Silica Fume Concretes: The Need for Rational Curing Standards". in *Concrete Technology: Past, Present, and Future*, Proceedings of V. Mohan Malhotra Symposium: American Concrete Institute. p. 605-617.
- Bentur A., Igarashi S.-I. y Kovler K. (2001), "Prevention of Autogenous Shrinkage in High-Strength Concrete by Internal Curing Using Wet Lightweight Aggregates". *Cement and Concrete Research*, 31: p. 1587-1591.
- Benz D.P. y Snyder K.A. (1999), "Protected Paste Volume in Concrete: Extension to Internal Curing Using Saturated Lightweight Fine Aggregate". *Cement and Concrete Research*, 29: p. 1863-1867.
- Carrasquillo R.L., Nilson A.H. y Slate F.O. (1981), "Properties of High Strength Concrete Subjected to Short-Term Loads." *Journal of The American Concrete Institute*, 78(3): p. 171-178.
- Hoff C.G. (2003), "Internal Curing on Concrete using Lightweight Aggregate". in Theodore Bremner Symposium on High-Performance Lightweight Concrete. Tesseloniki, Greece, p. 185-203.
- Holm T.A. y Bremner T. W. (2000), State-of-the-Art Report on High-Strength, High-Durability Structural Low-Density Concrete for Applications in Severe Marine Environments, in Innovations for Navigation Projects Research Program. US Army Corps of Engineers. Engineer Research and Development Center, Structures Laboratory: Vicksburg, MS.
- Holm T.A., Ooi O.S. y Bremner T.W. (2003), "Moisture Dynamics in Lightweight Aggregate and Concrete". in Theodore Bremner Symposium on High-Performance Lightweight Concrete. Tesseloniki, Greece, p. 167-184.
- Jensen O.M. y Hansen P.F. (2001a), "Autogenous Deformation and RH-change in Perspective". *Cement and Concrete Research*, 31(12): p. 1859-1865.
- Jensen O.M. y Hansen P.F. (2001b), "Water Entrained Cement-Based Materials: I. Principles and Theoretical Background". *Cement and Concrete Research*, 31: p. 647-654.
- Jensen O.M. y Hansen P.F. (2002), "Water Entrained Cement-Based Materials: II. Experimental Observations". *Cement and Concrete Research*, 32: p. 973-978.
- Jensen O.M. y Lura P. (2003), "Techniques for Internal Water Curing of Concrete". in *Advances in Cement and Concrete*. Copper Mountain, Colorado: Engineering Conferences International, p. 67-78.
- Kohno K., Okamoto T., Isikawa Y., Sibata T. y Mori H. (1999), "Effect of Artificial Lightweight Aggregate on Autogenous Shrinkage of Concrete". *Cement and Concrete Research*
- Kosmatka S.H., Kerkhoff B. y Panarese W.C. (2002), *Design and Control of Concrete Mixtures*. 14th ed. Engineering Bulletin 001. Skokie, IL: Portland Cement Association, 358.
- López M., Kurtis K.E y Kahn L.F. (2006), "The Use of Saturated Lightweight Coarse Aggregate Decreases Long-Term Deformations of High Performance Lightweight Concrete". in 7th CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete. Montreal: CANMET - ACI. (aceptado para publicación).
- Lura P., Benz D.P., Lange D.A., Kovler K., Bentur A. y van Breugel K. (2003), "Measurements of Water Transport from Saturated Pumice Aggregates to Hardening Cement Paste." in *Advances in Cement and Concrete*. Copper Mountain, Colorado: Engineering Conferences International, p. 89-99.
- Malhotra V.M. y Mehta P.K. (2005), *High-Performance, High-Volume Fly Ash Concrete: Materials, Mixture Proportions, Properties, Construction Practice, and Case Histories*. 2nd ed. Ottawa: Supplementary Cementing Materials for Sustainable Development Inc.

- Mehta P.K. y Monteiro P. J.M. (1993), *Concrete. Microstructure, Properties and Materials*. Second ed: Mc Graw-Hill.
- Mindess S., Young J.F. y Darwing D. (2003), *Concrete*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- Mohr B.J., Premenko L., Nanko H. y Kurtis K.E. (2005), "Examination of Wood-derived Powders and Fibers for Internal Curing of Cement-based Materials". in *Self-Sisseccation and Its Importance in Concrete Technology*. Gaithersbureg, Maryland, USA: Lund University Lund Institute of Technology. p. 229-244.
- Neville A.M. (1996), *Properties of Concrete*. Fourth ed. New York: Addison Wesley Logman Limited.
- Neville A.M. (2003), *Neville on Concrete: An Examination of Issues in Concrete Practice*. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute.
- Peterman M.B. y Carrasquillo R.L. (1986), *Production of High Strength Concrete*. Park Ridge: Noyes.
- Powers T.C. (1947), *A Discussion of Cement Hydration in Relation to the Curing of Concrete*, in *Proceedings of the Highway Research Board*: Washington DC. p. 178-188.
- Shah S.P. y Ahmad S. H. (1994), ed. *High Performance Concretes and Applications*. First ed. McGraw-Hill.
- Weber S. y Reinhardt H.W. (1997), "A New Generation of High Performance Concrete: Concrete with Autogenous Curing". *Advanced Cement Based Materials*, 6(2): p. 59-68.
- Zhutovsky S., Kovler K. y Bentur A. (2002), "Efficiency of Lightweight Aggregate for Internal Curing of High Strength Concrete to Eliminate Autogenous Shrinkage". *Materials and Structures*, 35: p. 97-101.