

INFLUENCIA DEL TIEMPO DE CURADO HÚMEDO EN LA RESISTENCIA Y DURABILIDAD DEL CONCRETO EN CLIMA TROPICAL

Rómel G. Solís-Carcaño¹, Eric I. Moreno¹ y Carlos Serrano-Zebadua²

RESUMEN

El curado del concreto es uno de los principales medios para garantizar que el material alcance sus propiedades deseables. En algunas regiones existen indicios de que el concreto no reduce significativamente su resistencia aun sin curar, debido a condiciones climáticas favorables, a esto se le denomina curado natural. Sin embargo es posible que la capa superficial del concreto sea vulnerable al efecto del intemperismo. Este estudio tuvo por objetivo determinar la influencia en el concreto del curado húmedo, tanto desde el punto de vista de su resistencia mecánica, como desde el punto de vista de su durabilidad; bajo un contexto de clima de sabana tropical y con la utilización de agregados calizos de alta absorción. Se fabricaron probetas con relación agua/cemento de 0.50 y fueron sujetas a diferentes lapsos de curado húmedo. Los resultados mostraron poca influencia del curado en la resistencia a la compresión, y alta influencia en la permeabilidad del material, por lo que se concluyó que en condiciones agresivas de exposición, el material debe ser siempre curado para mantenerlo durable, además de resistente.

Palabras clave: abrasión, carbonatación, concreto, curado, durabilidad, dureza, permeabilidad, porosidad, resistencia.

ABSTRACT

Curing of concrete is one of the main means to guarantee that the material reach its desirable properties. In some regions there is evidence that concrete did not significantly reduce its compressive strength even without curing due to favorable climatic conditions; this is known as natural curing. However, it is possible that the concrete's surface layer may be vulnerable to the effect of weathering. This study had the objective of determining the influence in the concrete of moist curing, from the point of view of compressive strength as well as from the point of view of durability; under a tropical savanna climate context and with the use of limestone aggregate of high absorption. Specimens with a water to cement ratio of 0.50 were cast and exposed to different periods of moist curing. Results show little influence of curing in the compressive strength, and high influence in the permeability of the material, thus it was concluded that under aggressive exposure conditions, the material should always be cure to achieve durability as well as strength.

Keywords: abrasion, carbonation, concrete, curing, durability, hardness, permeability, porosity, compressive strength.

RESUMO

O curado do concreto é um dos principais meios para garantir que o material atinja suas propriedades desejáveis. Em algumas regiões há indícios de que o concreto não reduz significativamente a sua resistência mesmo sem curar, devido a condições climáticas favoráveis, isso é chamado de curado natural. No entanto é possível que a camada superficial do concreto seja vulnerável aos efeitos das intempéries. Este estudo teve por objetivo determinar a influência no concreto do curado úmido, tanto do ponto de vista de sua resistência mecânica, como a partir do ponto de vista de sua durabilidade; sob um contexto de clima de savana tropical e com a utilização de agregados calcários de alta absorção. Foram fabricadas provetas com proporção de água/cimento de 0.50 e foram sujeitas a diferentes períodos de curado úmido. Os resultados mostraram pouca influência do curado na resistência à compressão e alta influência sobre a permeabilidade do material, portanto conclui-se que, em condições agressivas de exposição, o material deve ser sempre curado para mantê-lo durável, além de resistente.

Palavras chave: abrasão, carbonatação, concreto, curado, durabilidade, dureza, permeabilidade, porosidade, resistência.

⁽¹⁾ Profesores Investigadores de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán, Yucatán, México.
E-mail: tulich@tunku.uady.mx, emoreno@tunku.uady.mx

⁽²⁾ Estudiante de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán, Yucatán, México.
E-mail: sspacecowboy@hotmail.com

INTRODUCCIÓN

El curado del concreto es un proceso mediante el cual se producen las reacciones químicas de hidratación de los componentes del cemento, principalmente silicatos y aluminatos (Neville 1999); por medio de lo anterior se transforma la pasta de cemento fresco en una masa firme y dura con poder aglutinante.

En el lenguaje utilizado en la construcción se ha denominado tradicionalmente *curar* a los cuidados que se procuran al concreto para mantenerlo húmedo principalmente, y en un rango de temperatura satisfactoria para que se den los procesos de hidratación (10-27°C) (Dobrowolski 1998). Debido a que las condiciones climáticas no siempre son óptimas, la mayoría de las veces es necesario suministrar agua adicional a la de mezclado del concreto para mantenerlo húmedo por un período que puede ir de una a cuatro semanas a partir de que son retirados los moldes o cimbras. Otra forma de curar el concreto es aislar el material para evitar que pierda el agua que fue utilizada para el mezclado.

Se han reportado muchos estudios en los que se ha demostrado que cuando no se realiza acciones de curado en el concreto la resistencia a la compresión, principal indicador de la calidad del concreto, resulta significativamente inferior a la que alcanza cuando el concreto se mantiene húmedo por algún tiempo (Price 1951, Gonnerman y Shuman 1928). El proceso de secado del concreto se produce por la migración hacia el exterior del agua que no se ha enlazado químicamente con los compuestos del cemento. En un elemento de concreto, la parte más susceptible a secarse será la capa superficial que es la que más fácilmente puede perder agua por difusión; esta capa, se ha reportado, abarca entre 30 y 50 mm (Parrot 1988). Los espacios de los capilares en la pasta de cemento, que inicialmente se encuentran saturados, al secarse se transforman en poros dentro del material.

Aun cuando un elemento de concreto alcanzara sin suministro adicional de agua la resistencia necesaria para soportar los esfuerzos que las cargas mecánicas le imponen, es probable que su capa externa sea menos resistente y más porosa que el resto de la pieza. Lo anterior puede provocar desgaste prematuro o fragilidad de la superficie, así como una capa permeable que permita la penetración de agentes agresivos presentes en el medio ambiente, mismos que podrían disminuir la durabilidad del elemento.

Los problemas más severos por durabilidad se presentan cuando el concreto ha sido reforzado con barras de acero para resistir esfuerzos, principalmente de tensión. El ingreso y difusión de humedad, oxígeno, iones cloruros o dióxido de carbono, a través de la capa externa del concreto —que protege al acero— puede provocar que el acero se despasive y corra; el resultado de esto suele ser la ruptura del concreto de la zona cercana al acero, reduciendo la durabilidad del elemento.

En regiones geográficas con clima húmedo se ha observado que es posible que se produzca un curado natural, sin necesidad de realizar acciones especiales; lo anterior podría ocurrir si la humedad relativa del medio ambiente es superior al 80% durante la mayor parte del día, lo cual podría evitar el movimiento del agua del concreto hacia el exterior.

En la Península de Yucatán, en México, con clima cálido subhúmedo, la práctica del curado húmedo es un procedimiento que sólo se realiza cuando es exigido por la supervisión, ya que la experiencia profesional y algunos estudios han mostrado que el concreto obtiene resistencia a la compresión similar tanto cuando se toman acciones para proporcionarle humedad, como cuando se deja secar en forma natural al medio ambiente (Solís y Moreno, 2005). De acuerdo a la clasificación climática Köppen-Geiger-Pohl, publicada por Vladimir Köppen en 1936 y revisada por dos de sus discípulos en 1953, el clima de la Península de Yucatán corresponde al denominado Aw, genéricamente llamado como: Clima de Sabana tropical; en donde el grupo climático representado por la letra A significa lluvioso tropical, y se define con las siguientes características (Inzunza 2005):

- a) Todos los meses tienen una temperatura media superior a 18° C.
- b) No existe estación invernal.
- c) Las lluvias son abundantes.

Mientras que la w, que representa el subgrupo —que depende de la humedad— significa estación invernal seca.

El estudio que se reporta tuvo por objetivo determinar la influencia del tiempo de aplicación de un proceso estándar de curado húmedo sobre algunas propiedades del concreto. El enfoque de la investigación se basó en evaluar el material, tanto desde el punto de vista de su resistencia mecánica, como desde el punto de vista de su durabilidad.

METODOLOGÍA

El experimento se basó en exponer probetas, moldeadas a partir de una misma muestra de concreto, a cinco diferentes

tratamientos de curado húmedo. Para esto se hizo variar el lapso durante el cual las probetas se mantuvieron húmedas por medio de inmersión en agua.

Los tratamientos de curado al concreto fueron los siguientes:

- Tratamiento 1:** Permanentemente expuesto al medio ambiente en el laboratorio.
- Tratamiento 2:** Tres días húmedo y exposición posterior al medio ambiente en el laboratorio.
- Tratamiento 3:** Siete días húmedo y exposición posterior al medio ambiente en el laboratorio.
- Tratamiento 4:** Veintiocho días húmedo y exposición posterior al medio ambiente en el laboratorio.
- Tratamiento 5:** Permanentemente húmedo.

Para la fabricación del concreto se utilizó cemento Portland compuesto con resistencia nominal de 30 MPa (CPC-30), que es el de uso común en la Península de Yucatán, región en la que se realizó el estudio. Los agregados pétreos empleados fueron de roca caliza triturada obtenida en mantos superficiales (de 1 a 10 metros de profundidad). Tanto la grava como la arena utilizadas en el estudio presentan como características distintivas que tienen una alta absorción y una gran cantidad de partículas finas; otra característica es que la arena es relativamente gruesa. La Tabla 1 presenta las principales propiedades físicas de la muestra de los agregados utilizados.

| Tabla 1: Propiedades físicas de los agregados utilizados. | | |
|--|--------------|--------------|
| Propiedad | Grava | Arena |
| Peso volumétrico seco suelto (kg/m ³) | 1 169 | 1 344 |
| Peso volumétrico seco compacto (kg/m ³) | 1 244 | -- |
| Gravedad específica | 2.35 | 2.46 |
| Absorción (%) | 7.22 | 5.79 |
| Tamaño máximo de agregado | 3/4" | -- |
| Módulo de finura | -- | 3.00 |

El concreto se diseñó siguiendo el método de volúmenes absolutos del Instituto Americano de Concreto (ACI 211.1 1998). Se utilizó una relación A/C de 0.50 que corresponde a un concreto de calidad estructural con resistencia a la compresión en un rango entre 30 y 40 MPa; rango que depende, principalmente, de las propiedades de los agregados. Esta A/C fue escogida debido a que ha sido utilizada en los principales estudios reportados sobre los efectos del curado húmedo (Price 1951, Gonnerman y Shuman, 1928). La Tabla 2 presenta la dosificación utilizada para la fabricación del concreto.

Para evaluar en forma estándar la calidad del concreto se realizaron pruebas de resistencia a compresión uniaxial y porosidad (ASTM C39, 2005 y ASTM C 642, 2006). Para la primera se utilizaron probetas cilíndricas de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura; y para la segunda, probetas cilíndricas de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura. Las pruebas

| Tabla 2: Dosificación del concreto utilizado. | |
|--|------------------------------------|
| Materiales | Cantidad (kg/m³) |
| Cemento | 430 |
| Agua | 215 |
| Grava | 766 |
| Arena | 783 |

de resistencia se realizaron a las edades de 3, 7, 28, 90 y 180 días; las pruebas de porosidad se realizaron a 180 días. Para ambas pruebas, la muestra de concreto —por cada edad— consistió en tres cilindros obtenidos de un mismo lote de concreto fabricado en laboratorio.

Las características que se estudiaron para determinar el efecto de los diferentes tratamientos de curado en las propiedades de la capa superficial del concreto fueron: la permeabilidad al aire, la carbonatación, la resistencia a la abrasión y la dureza superficial.

Para las pruebas de permeabilidad al aire (CEB-FIP 1991) se utilizaron probetas prismáticas de 15 x 15 x 60 cm; estas pruebas se realizaron a la edad de 200 días, buscando que las probetas que pasaron 180 días inmersas en agua tuvieran 20 días de acondicionamiento al medio ambiente. El equipo de medición utilizado fue el permeabilímetro Torrent. La prueba consiste en succionar el aire que se encuentra en la capa superficial del concreto (en un rango de 5 a 10 cm), por medio de una bomba de vacío acoplada a un circuito electrónico. El valor que se obtiene es el coeficiente de permeabilidad del concreto al aire (kt) calculado a partir de la Ley de Poiseuille para medición de flujo estacionario laminar, y se presenta en $\text{m}^2 \times 10^{-16}$. La muestra para las pruebas de permeabilidad consistió en 2 probetas por cada tratamiento de curado.

Para las pruebas de carbonatación se utilizaron probetas cilíndricas de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura; estas pruebas se realizaron a la edad de 200 días. El proceso de carbonatación se produce por la reacción del dióxido de carbono de la atmósfera con los productos hidratados del cemento. La prueba de carbonatación del concreto (UNE 1994) se realizó de manera indirecta por medio de la determinación de la variación del potencial de hidrógeno (pH) del concreto. Se utilizó un método de colorimetría en el que la coloración del material es un indicador del valor de su pH, desde el color púrpura para los valores originales de la alcalinidad del concreto (>9.5), hasta incoloro para valores de alcalinidad bajos (<8.0). El valor que se mide desde la superficie es la profundidad del concreto que no modifica su color, en milímetros. La muestra consistió en 3 probetas por cada tratamiento de curado; no se efectuó esta prueba para el tratamiento 5 de curado en el cual el concreto pasó 180 días inmerso en agua y por lo tanto no se produjo durante este lapso la reacción química correspondiente.

Con los valores de la profundidad de carbonatación se calcularon los coeficientes de carbonatación haciendo uso del modelo simplificado que se muestra en la Ecuación 1 (Moreno 2000), en donde X es la profundidad de carbonatación (en mm), k es el coeficiente de carbonatación (en $\text{mm/año}^{1/2}$) y t es el tiempo de exposición al medio ambiente (en años):

$$X = k\sqrt{t} \quad (1)$$

Para las pruebas de desgaste por abrasión (EN 2001) se utilizaron probetas prismáticas de 20 x 20 x 10 cm; las pruebas se realizaron a la edad de 200 días. Se utilizó una máquina de abrasión que mide el desgaste en rocas y losas de concreto. La prueba consiste en provocar desgaste en el concreto mediante la abrasión producida por una rueda de desgaste a la cual se le aplica polvo de alúmina. El valor que se obtiene es el ancho de la porción desgastada del concreto medido en milímetros. La muestra para las pruebas de desgaste por abrasión consistió en 3 probetas por cada tratamiento de curado.

Para las pruebas de dureza superficial del concreto (ASTM C 805, 2002) se utilizaron probetas prismáticas de 15 x 15 x 60 cm; las pruebas se realizaron a la edad de 200 días, haciendo uso de un martillo de rebote Schmidt o esclerómetro. La prueba consiste en hacer rebotar una masa contra la superficie del concreto, haciendo uso de una cantidad constante de energía; dependiendo del rebote elástico de la masa, que afecta alrededor de 3 cm de profundidad, se determina la dureza de la superficie. El valor que se obtiene es un índice de dureza que expresa el cociente entre la distancia que recorre la masa y la extensión inicial del resorte que genera la energía. La muestra consistió en 2 probetas por tratamiento de curado.

La asignación de las probetas a cada tratamiento de curado se realizó de manera aleatoria; así como también la asignación de las probetas, de cada tratamiento, para ser probadas a cada edad. Todo el experimento se replicó con un segundo lote de concreto, y los promedios de los resultados de las dos réplicas fueron asignados a los tratamientos de curado y edades correspondientes.

Se recabaron las temperaturas y humedades relativas del lapso durante el cual se llevó a cabo el estudio, en una estación meteorológica ubicada en las mismas instalaciones donde se realizó la investigación.

RESULTADOS

El revenimiento de ambos lotes de concreto fabricados fue de 10 cm, y los contenidos de aire medidos fueron de 2.7 y 2.6 %. La Tabla 3 presenta los resultados de la resistencia a compresión de los concretos sujetos a los diferentes tratamientos de curado, para las cinco edades estudiadas. En esta tabla, a la derecha de cada valor de la resistencia se presenta, como referencia, la condición de humedad (C) de las probetas en el momento de ser probadas a la compresión: H significa condición húmeda (probetas que permanecieron inmersas en agua hasta el día de la prueba, como excepción aquellas que se probaron a edad de tres días fueron consideradas húmedas aun cuando se hayan curado al ambiente); y S significa condición seca (probetas que permanecieron al medio ambiente por una cantidad de días antes de la prueba, cantidad variable según haya sido el tratamiento de curado y la edad de prueba); respecto a esto último, se menciona como ejemplo que las probetas sujetas al tratamiento de curado 2 (tres días húmedo y exposición posterior al medio ambiente), de acuerdo a la edad de prueba tuvieron: 4, 25, 87 ó 177 días al medio ambiente.

Tabla 3: Resistencia a la compresión (R) y condición de humedad (C) del concreto con A/C de 0.50 a diferentes edades y tratamientos de curado (MPa).

| Edad | Tratamientos de curado | | | | | | | | | |
|------------|------------------------|---|------|---|------|---|------|---|------|---|
| | 1 | | 2 | | 3 | | 4 | | 5 | |
| | R | C | R | C | R | C | R | C | R | C |
| 3 | 25.6 | H | 26.2 | H | - | - | - | - | 26.2 | H |
| 7 | 31.6 | S | 31.3 | S | 32.6 | H | - | - | 32.6 | H |
| 28 | 36.8 | S | 36.8 | S | 37.3 | S | 34.0 | H | 34.0 | H |
| 90 | 37.6 | S | 37.6 | S | 37.4 | S | 37.5 | S | 34.0 | H |
| 180 | 38.2 | S | 38.7 | S | 39.1 | S | 39.4 | S | 36.8 | H |

H: húmeda, S: seca.

La Tabla 4 presenta los porcentajes de porosidad y los coeficientes de permeabilidad al aire ($10^{-16}m^2$) medidos en los concretos sujetos a los cinco tratamientos de curado, a edades de 180 y 200 días, respectivamente.

Tabla 4: Porcentaje de porosidad y coeficiente de permeabilidad del concreto con A/C de 0.50 para diferentes tratamientos de curado.

| | Tratamientos de curado | | | | |
|---|------------------------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Porosidad (%) | 23.15 | 22.29 | 21.03 | 20.63 | 19.86 |
| Coefficiente de permeabilidad ($10^{-16}m^2$) | 8.83 | 6.09 | 4.84 | 3.88 | 1.42 |

La Tabla 5 presenta las profundidades de carbonatación medidas y los coeficientes de carbonatación (k_c) calculados (Ecuación 1) en los concretos sujetos a cuatro tratamientos de curado, a la edad de 200 días.

La Tabla 6 presenta los resultados de la prueba de desgaste por abrasión y de la prueba de dureza superficial realizada por medio del martillo de rebote en los concretos sujetos a los cinco tratamientos de curado, a la edad de 200 días.

Tabla 5: Profundidades y coeficientes de carbonatación (kt) del concreto con A/C de 0.50 para diferentes tratamientos de curado.

| | Tratamientos de curado | | | |
|---------------------------------------|------------------------|------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Profundidad (mm) | 2.2 | 1.8 | 1.4 | 0.9 |
| Coefficiente (mm/año ^{1/2}) | 3.13 | 2.56 | 1.99 | 1.28 |

Tabla 6: Desgaste por abrasión del concreto con A/C de 0.50 para diferentes tratamientos de curado.

| | Tratamientos de curado | | | | |
|-----------------------------|------------------------|------|------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Desgaste a la abrasión (mm) | 26.9 | 24.9 | 24.0 | 23.4 | 22.6 |
| Índice de rebote | 31 | 32 | 32 | 33 | 33 |

DISCUSIÓN

Los resultados de la resistencia a compresión (Tabla 3) confirmaron lo que se ha reportado en estudios previos realizados en el mismo clima y con agregados de características similares (Solís *et al.* 2005 y 2011), en el sentido de que el incremento de resistencia de concretos sujetos a procesos de curado húmedo respecto a los que son curados al ambiente es baja, si se compara con que la se obtuvo en el estudio más citado en los libros de tecnología del concreto (Price, 1951).

Tabla 7: Comparación entre las tasas de ganancia de resistencia (MPa/día) entre el estudio de Price (1951) y este estudio.

| Período (días) | Estudio | Tratamientos de curado | | Diferencia entre los dos tratamientos |
|----------------|--------------|------------------------|------|---------------------------------------|
| | | 1 | 5 | |
| 0 - 7 | Price | 1.90 | 2.46 | + 0.56 |
| | Este estudio | 4.51 | 3.74 | - 0.77 |
| 8 - 28 | Price | 0.21 | 0.67 | + 0.46 |
| | Este estudio | 0.24 | 0.37 | + 0.13 |
| 29 - 180 | Price | <0.01 | 0.05 | + 0.05 |
| | Este estudio | 0.01 | 0.02 | + 0.01 |

La Tabla 7 presenta la comparación de las tasas de ganancia de resistencia entre el estudio de Price y el que se reporta, para los dos tratamientos de curado más extremos: siempre al aire (1) y siempre húmedo (5). En el caso del estudio de Price, los concretos que se mantuvieron siempre húmedos tuvieron, en los tres períodos, tasas de ganancia de resistencia muy superiores con respecto a los concretos que se mantuvieron siempre al aire; en el presente estudio no se observó ese comportamiento.

Los datos mostrados en la Tabla 7 permiten suponer que para los concretos que estuvieron siempre al aire en el presente estudio, los compuestos contenidos en el cemento tuvieron condiciones de humedad que permitieron su hidratación, en condiciones equiparables a los concretos que permanecieron siempre húmedos. De acuerdo a estudios realizados en el

mismo contexto (de clima y materiales utilizados), este comportamiento ha sido atribuido, principalmente, a un efecto de curado interno provocado por la alta porosidad de los agregados (Terán 2012).

Las pequeñas diferencias que los tratamientos de curado provocaron en la resistencia a la compresión (Tabla 3), permitieron observar el efecto, en esta variable, de la condición de humedad de las probetas. Las probetas que estuvieron secas en el momento de las pruebas destructivas tuvieron mayores valores de resistencia que las húmedas, las diferencias promedio fueron de 3.0, 3.5 y 2.0 MPa para las pruebas a 28, 90 y 180 días, respectivamente. Los valores anteriores representan de manera combinada los efectos en la resistencia del incremento en el tiempo de curado húmedo (aumento de resistencia) y de la condición de humedad de la probeta (disminución de resistencia); siendo claro que predominó este último efecto. El efecto de la humedad en las pruebas destructivas a compresión ha sido estudiado por Bartlett y MacGregor (1994).

Las otras cinco variables incluidas en el estudio, relacionadas con la durabilidad del concreto, mostraron de manera consistente que mientras mayor fue el tiempo de curado húmedo, mejor fue el valor del parámetro de referencia medido.

De acuerdo a criterios establecidos (CYTED 2000) para que un concreto sea considerado de *buena calidad y compactidad* su porosidad debe ser menor de 10 %; y para que sea considerado de *calidad moderada*, su porosidad debe estar entre 10 y 15 %. En el presente estudio, independientemente del tratamiento de curado aplicado, todos los concretos mostraron porcentajes de porosidad muy por encima de esos valores; sin embargo, resultados similares han sido reportados anteriormente para los concretos preparados con agregados de alta porosidad sin menoscabo de su calidad (Solís y Moreno, 2006).

Desde el punto de vista de la permeabilidad, de acuerdo con Torrent y Frenzer (1999) el rango de permeabilidad al aire para concretos *normales* es de 0.1 a 1.0. En el estudio que se reporta el mejor valor medido de la permeabilidad fue de 1.42 (concreto húmedo por 180 días), el cual se aproxima a ese rango.

La Fig. 1 muestra la relación entre las variables porosidad y permeabilidad, las cuales estuvieron fuertemente correlacionadas (r^2 de 0.96 y significancia de 0.004). En esta figura se puede apreciar que, aun cuando se utilicen agregados altamente porosos (que a su vez producen concretos altamente porosos), la permeabilidad disminuyó hasta valores aceptables cuando el concreto se mantuvo húmedo por 180 días.

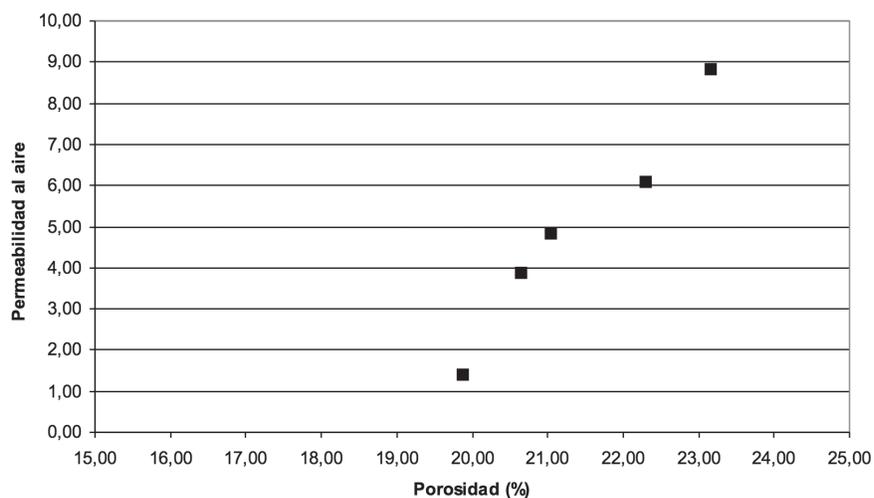


Fig. 1: Relación entre la porosidad y la permeabilidad al aire, para concretos con A/C de 0.50 y agregados calizos de alta absorción.

De acuerdo a criterios establecidos (CYTED 2000) para que un concreto sea considerado de elevada resistencia a la carbonatación debe tener valores de k_t iguales o menores a $3 \text{ mm/año}^{1/2}$. En el presente estudio se calcularon valores dentro de este intervalo para todos los concretos que tuvieron algún lapso de curado húmedo (desde 3 hasta 180 días), observándose la disminución de k_t conforme se incrementó el tiempo de curado (Tabla 5).

Por otro lado, el coeficiente de carbonatación obtenido para el concreto que estuvo durante 200 días al medio ambiente, $3.13 \text{ mm/año}^{1/2}$, puede compararse con el valor de $3.19 \text{ mm/año}^{1/2}$ reportado anteriormente (Solís *et al.*, 2007) para concreto fabricado con la misma A/C, agregados similares y exposición al mismo ambiente por 4 años, después de 7 días de curado húmedo.

Al igual a las variables anteriores, en la medición del desgaste por abrasión se encontró que los valores mejoraron conforme se incrementó el tiempo de curado, en un rango que estuvo de 26.9 a 22.6 mm (Tabla 6). No siendo conocidos por los autores trabajos previos que establezcan criterios para juzgar la calidad del concreto en base al desgaste por abrasión, se utilizan como referencia resultados reportados como estudios preliminares (Solís *et al.*, 2008). De acuerdo a esta referencia, se midió el desgaste en concretos fabricados con cinco diferentes A/C en el rango de 0.30 a 0.70, utilizando una única muestra por cada tipo de concreto. Los resultados reportan un rango de desgaste entre 30.28 y 23.50 mm, y una pendiente promedio de 1.7 mm por cada décima de relación A/C. De acuerdo a lo anterior, la diferencia de calidad de la capa superficial de los concretos sujetos a los dos tratamientos de curado más extremos del presente estudio (26.9 siempre al aire y 22.6 siempre húmedo) podría corresponder calidades de concreto con diferencias de hasta dos décimas de A/C, si ambos tuvieran un curado estándar.

El índice de rebote no mostró mucha variación, el rango de las mediciones a los concretos sujetos a los diferentes tratamientos de curado fue 31 a 33. Del análisis de los datos de un estudio realizado en la misma región y utilizando los mismos agregados (Salazar 1985), se obtuvo que por cada incremento de una décima de A/C el índice de rebote disminuyó 3.5 aproximadamente. Según lo anterior esta variable no mostró ser sensible al tratamiento de curado.

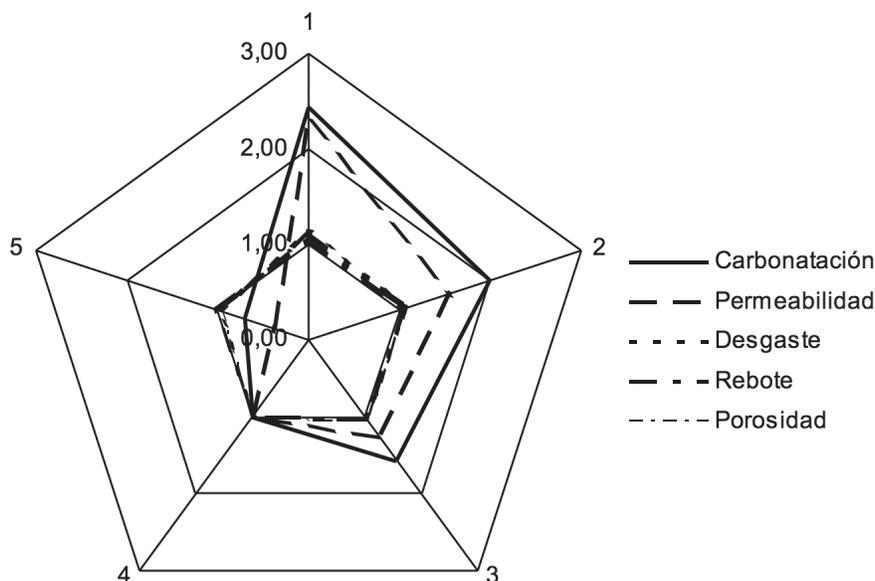


Fig. 2: Gráfica radial de los valores normalizados de las variables medidas para los cinco tratamientos de curado.

Para determinar cuáles de las variables estudiadas asociadas a la durabilidad del concreto fueron más sensibles a la variación del lapso de curado húmedo, se normalizaron los valores medidos dividiéndolos entre los valores que correspondieron al concreto curado por 28 días (tratamiento 4). Para el caso del índice de dureza, cuya magnitud aumenta con la calidad del concreto, se calcularon sus valores inversos, para cambiar el sentido de la escala de calidad; y para el caso de la carbonatación que no se midió para el tratamiento 5, este valor fue obtenido por extrapolación.

Los valores normalizados se presentan en una gráfica de tipo radial en la Fig. 2. Los vértices del pentágono representan los diferentes tratamientos de curado, y los polígonos irregulares, los valores normalizados de las cinco variables. En esta figura se aprecia que la carbonatación y la permeabilidad tuvieron las mayores variaciones al hacer modificar experimentalmente la duración del curado húmedo; los valores normalizados de las otras tres variables se concentran alrededor del valor uno de la escala, para todos los tratamientos de curado.

Contexto climático del experimento

Las Fig. 3 y 4 presentan los valores diarios de las temperaturas y humedades relativas máximas y mínimas, tomados de la estación meteorológica ubicada a 50 m del laboratorio en donde se realizaron las pruebas a los concretos. El experimento fue realizado en las estaciones de invierno y primavera.

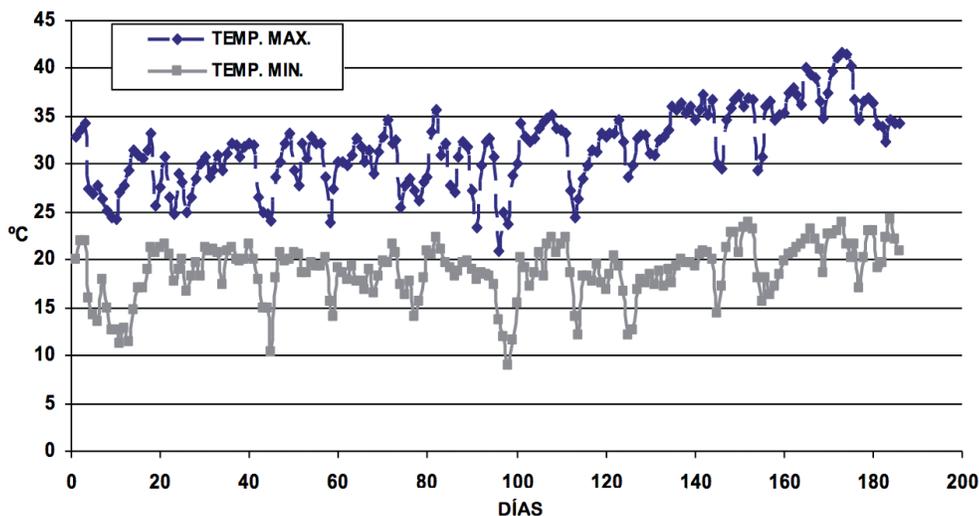


Fig. 3: Variación de la temperatura durante el estudio.

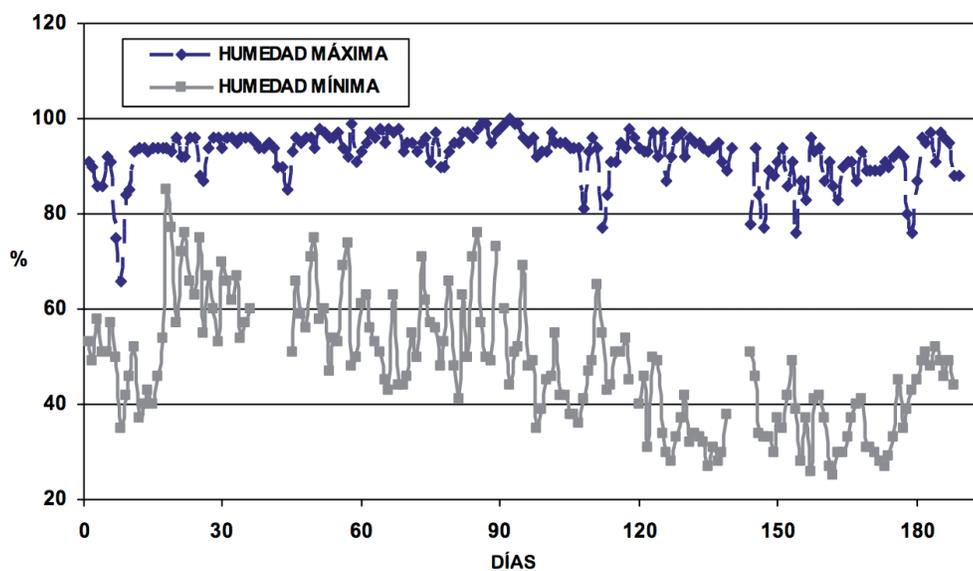


Fig. 4: Variación de la humedad relativa durante el estudio.

Las altas temperaturas que se aprecian pueden ser un factor para que los concretos que permanecieron al aire permanentemente (tratamiento 5) hayan acelerado sus reacciones de hidratación; de ahí que hayan alcanzado una mayor madurez en las diferentes edades de prueba, respecto a los concretos que se mantuvieron inmersos en agua (tratamiento 1).

Todos los días se presentaron altos valores de la humedad relativa (> 80%), sin embargo también se tuvieron valores bajos (en un rango entre 70% y 25%), por lo que se esperarían ciclos de humidificación y secado durante cada día. Por los resultados obtenidos en las pruebas de resistencia se pudiera suponer, que la masa interna del concreto permaneció húmeda aun en las horas más críticas del día.

Por otra parte, una combinación de alta temperatura y baja humedad en ciertas horas del día, probablemente, produjo desecación en la capa superficial del concreto de las probetas expuestas al medio ambiente. A esto se puede atribuir que el concreto con menor tiempo de curado haya presentado propiedades físicas menos favorables en su capa superficial.

CONCLUSIONES

Dentro de las edades que abarcó el estudio, y para concreto con agregado calizo de alta absorción, no se comprobó una ganancia en la resistencia a la compresión por el efecto del tiempo de curado húmedo; pudiéndose suponer que el concreto permanentemente húmedo seguiría incrementando su resistencia a largo plazo.

Los resultados de las pruebas realizadas a la capa superficial del concreto fueron consistentes, mostrando que el tiempo de curado húmedo mejoró las propiedades de esta porción del material, lo cual es de suma importancia para la durabilidad de los elementos de concreto, especialmente en el caso de la corrosión del acero de refuerzo.

El curado húmedo mostró ser un factor que afecte la carbonatación y la permeabilidad del concreto, variables asociadas a la penetración y difusión de compuestos químicos; y mostró menor influencia en el desgaste y la dureza, factores asociados al ataque físico del concreto.

El efecto positivo de la exposición del concreto bajo condiciones de curado húmedo fue más notorio en las propiedades físicas de la capa superficial, que en la resistencia mecánica de la masa total del concreto; por lo que en condiciones agresivas de exposición al clima cálido, el material debe ser siempre curado para mantenerlo durable, además de resistente.

REFERENCIAS

ACI 211.1 (1998), “Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight and Mass Concrete”, *American Concrete Institute*, Farmington Hills, USA, pp. 38.

ASTM C 39 (2005), “Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens”, *American Society for Testing and Materials*, West Conshohocken, USA, pp. 5.

ASTM C 642 (2006), “Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete”, *American Society for Testing and Materials*, West Conshohocken, USA, pp. 3.

ASTM C 805 (2002), “Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete”, *American Society for Testing and Materials*, West Conshohocken, USA, pp. 3.

Bartlett, F., MacGregor, J. (1994), “Effect of moisture condition on concrete core strengths”, *ACI Materials Journal*, Detroit, USA, Vol. 91, No. 3, pp. 227-236.

CEB-FIP Model Code 1990 (1993), “Classification by Durability” *CEB Bulletin No. 213/214*, Lausanne, Suiza, pp. 460.

CYTED (2000), “Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión de estructuras de hormigón armado”, *Red Temática DURAR, Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo*, Maracaibo, Venezuela, pp. 208.

Dobrowolski, J. (1998), “Concrete Construction Handbook”, fourth edition, McGraw-Hill, Inc, New York, USA, pp. 6.1-6.32.

EN-1342 (2001), “Sets of natural stone for external paving – Requirements and test methods” *European Committee for Standardization*, Bruselas, Bélgica, pp. 35.

Gonnerman, H., Shuman, C. (1928), “Flexure and tension tests of plain concrete”, *Report to the Chief, Research and Development Laboratories of the Portland Cement Association*, Washington, USA, pp. 149.

Inzunza, J. (2005), “Clasificación de los climas de Köppen”, *Ciencia Ahora*, Chillán, Chile, No. 15, pp. 1-14.

Moreno, E. I. (2000), "La corrosión del acero de refuerzo inducida por la carbonatación del concreto", *Ingeniería Revista Académica de la Facultad de Ingeniería*, Universidad Autónoma de Yucatán, Mérida, México, Vol. 4, No. 2, pp.43-48.

Neville, A. (1999), "*Tecnología del concreto*", cuarta edición, IMCYC, D.F., México, pp. 612.

Parrot, L. (1988), "Moisture profile in drying concrete", *Advances in Cement Research*, Londres, Reino Unido, Vol. 1, No. 3, pp. 164-172.

Price, W. (1951), "Factors influencing concrete strength", *Journal of the American Concrete Institute*, Detroit, USA, Vol. 47, No. 2, pp. 145-159.

Salazar, M. (1985), "Alcances del martillo de rebote Schmidt como procedimiento no destructivo para la evaluación de la calidad del concreto", *Tesis inédita de Maestría*, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, Mérida, México, pp. 132.

Solís, R., Moreno, E. I. (2006), "Análisis de la porosidad del concreto con agregado calizo", *Revista de la Facultad de Ingeniería de la U.C.V. Caracas*, Venezuela, Vol. 21, No. 3, pp. 101-109.

Solís, R., Moreno, E. (2005), "Influencia del curado húmedo en la resistencia a compresión del concreto en clima cálido subhúmedo", *Ingeniería Revista Académica de la Facultad de Ingeniería*, Universidad Autónoma de Yucatán, Mérida, México, Vol. 9, No. 3, pp. 5-17.

Solís, R., Moreno, E., Estrella, C. (2007), "Carbonatación natural del concreto con agregado calizo", *IX Congreso Latinoamericano de Patología y XI Congreso de Control de Calidad en la Construcción CONPAT'2007*, Quito, Ecuador, pp. 8.

Solís, R., Moreno, E., Serrano, C. (2008), "Influencia del tiempo de curado húmedo en la capa superficial del concreto", *Memorias del Congreso ASME USB 2008*, Caracas, Venezuela, pp. 6.

Solís, R., Moreno, E. I., Vázquez, C. (2011), "Diferencias en la resistencia de concretos sujetos a curados húmedos y al ambiente en clima cálido subhúmedo", *Concreto y Cemento: Investigación y Desarrollo*, IMCYC, D.F., México, Vol. 3, No. 1, pp. 25-35.

Terán, L. (2012), "*Influencia de la absorción de los agregados calizos y de la humedad ambiental en el curado del concreto en clima cálido sub-húmedo*". *Tesis inédita de Maestría*, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, Mérida, México, pp. 98.

Torrent, R., Frenzer, G. (1995), "A method for the rapid determination of the coefficient of permeability of the covercrete"; *Symposium NDT-CE*, 985-991, Berlín, Alemania, pp. 985-992.

UNE 112-011 (1994), "*Determinación de la profundidad de carbonatación en hormigones endurecidos y puestos en servicio*", Norma Española, Madrid, España, pp. 4.