

Determinación del pH de la solución de los poros de concreto después de un proceso acelerado de carbonatación.

Moreno Eric I.¹

Recibido: 28 de octubre de 2005 - Aceptado: 31 de agosto de 2006

RESUMEN

En el concreto reforzado, el pH de la solución del poro es importante en términos de durabilidad; por ejemplo, en el caso de corrosión del refuerzo, un valor alto de pH es necesario para mantener pasivo el acero. La carbonatación de concreto inicia la corrosión del acero de refuerzo debido a la reducción del pH del agua del poro, proceso que tradicionalmente ha sido medido usando un indicador ácido-base de color que se rocía sobre una sección de concreto recién expuesto. Sin embargo, este método sólo nos da una indicación del valor del pH del agua del poro. Este artículo muestra una aplicación de un método llamado Lixiviación In-Situ (LIS), método que examina el pH inicial de la solución del poro y sus cambios debido a la carbonatación en concretos de composición variada. Los resultados antes de la carbonatación mostraron un pH dependiente de la cantidad del cemento usado en el material cementante para mezclas con las mismas características. El valor del pH final después de la exposición a la carbonatación acelerada fue menor conforme menor cantidad de cemento se utilizó en el material cementante y estuvo en el rango de 8 a 10 unidades. Los resultados son correlacionados con el inicio de la corrosión en pruebas paralelas, para evaluar el balance entre las propiedades mejoradas del concreto y la susceptibilidad a la corrosión inducida por la carbonatación en cementos mezclados.

Palabras clave: carbonatación, concreto, lixiviación, pH de la solución del poro, puzolanas.

pH determination of concrete pore solution after an accelerated carbonation process.

ABSTRACT

In reinforced concrete, the pH of the pore solution is important in terms of durability; for example, in the case of reinforcement corrosion, a high pH value is needed to keep steel passive. Concrete carbonation initiates corrosion of reinforcing steel by lowering pore water pH, a process that has traditionally been followed using an acid-base color indicator sprayed on freshly exposed concrete cross sections. However, this method only gives a rough indication of the pore water pH value. This paper shows application of the In-Situ Leaching (ISL) method to examine the initial pore solution pH and the changes due to carbonation in concretes of varying composition. Results before carbonation showed initial pH dependence with the quantity of cement used in the cementitious material for mixtures with the same characteristics. The final pH value after accelerated carbonation exposure was lower the lower the amount of cement employed in the cementitious material, and in the range of 8 to 10 units. The results are correlated with the onset of corrosion from parallel tests, to evaluate the compromise between enhanced concrete properties and susceptibility to carbonation-induced corrosion in blended cements.

Keywords: carbonation; concrete; leaching; pH pore solution; pozzolans.

¹ Profesor-Investigador del C. A. de Estructuras y Materiales. Facultad de Ingeniería, UADY. emoreno@uady.mx

INTRODUCCIÓN

La durabilidad de las estructuras de concreto reforzado estriba en la capacidad que tiene el material tanto para evitar el ingreso de agentes agresivos como el agua, el oxígeno, el dióxido de carbono, y los cloruros, como para soportar ciertas concentraciones sin ver comprometida su integridad. En el caso del dióxido de carbono y los cloruros, uno de los parámetros para evaluar dicha capacidad está dado por el valor del pH del agua del poro del concreto. A mayor pH se requiere, en el caso de la carbonatación, mayor cantidad de CO₂ para carbonatar el concreto y, en el caso de la corrosión por cloruros, mayor concentración de cloruros para iniciar la corrosión del acero de refuerzo.

La carbonatación del concreto puede afectar el pH del agua del poro. La carbonatación es debida a la reacción de los productos del cemento hidratado con el dióxido de carbono presente en la atmósfera (Moreno 2000). Como resultado de esta reacción, el pH de la solución del poro puede descender de >12.5 a ~8 unidades; bajo estas condiciones la barra de refuerzo pierde su estado pasivo, provisto por la alcalinidad del concreto que la rodea y la corrosión del acero se desarrolla. El método más común para determinar la profundidad de carbonatación en concreto es usando un indicador ácido-base de color (solución de fenolftaleína) rociada sobre una superficie recién expuesta del concreto. Sin embargo, esta técnica sólo indica un valor aproximado de pH, ya que la fenolftaleína presenta un rango de viraje de pH de 8.2 a 10.0, siendo incolora por debajo de 8.2 y presentando un color rosado fuerte (fucsia) por encima de 10. Por lo tanto, la prueba de la fenolftaleína sólo nos indica cuando el concreto tiene un pH menor de 8.2 o mayor de 10.0.

Como el indicador de color es sólo una aproximación, es deseable una forma más precisa de determinar el pH. En el pasado, una técnica de lixiviación fue utilizada, consistiendo en mezclar el polvo de cemento o concreto molido con agua en una relación 1:1 (Grimes *et al.* 1979). Después de revolver la mezcla, la solución fue filtrada y entonces, se determinó el pH. Como el cemento hidratado tenía cerca de 20% de hidróxido de calcio, el proceso estaba lixivando hidróxido de calcio y diluyendo la concentración de sodio y potasio. Por lo tanto, el pH de la solución filtrada se aproximaba al pH de una solución de hidróxido de calcio saturado.

Usando un dispositivo de extracción del agua del poro para obtener la solución de los especímenes de mortero, Diamond (Barneyback y Diamond 1981) demostró que el pH del cemento hidratado es más alto

que el de una solución de hidróxido de calcio, contrario a lo que se pensaba anteriormente. Él encontró que el agua del poro era una solución de hidróxidos de sodio y de potasio, los cuales eran responsables del alto pH en la solución del poro del concreto, junto con el hidróxido de calcio (Diamond 1981). Otros investigadores han usado el dispositivo de extracción del agua de poro para estudiar la composición de la solución del poro de las pastas de cemento hidratado hechas de cementos puzolánicos (Andersson *et al.* 1989), así como la concentración de cloruros libres de los especímenes de concreto expuestos a soluciones de cloruro (Arya y Newman 1990). Esta técnica fue utilizada para caracterizar el cambio microestructural en morteros hechos con ceniza volante y expuestos en ambientes de dióxido de carbono (Goñi *et al.* 1997), y para determinar el pH en pastas carbonatadas de cemento puzolánico (Moreno 2001). Sin embargo, uno de los inconvenientes de esta técnica es que es más adecuada para usarse con pastas y morteros de cemento hidratado. Para usarlas con muestras de concreto, las partículas duras de agregado tienen que ser removidas.

Un método denominado Lixiviación In-Situ (LIS), puede ser usado para estudiar el pH inicial de la solución del poro y los cambios debidos a la carbonatación, dando una información más precisa que la prueba del indicador de color (Sagüés *et al.* 1997). Tiene las ventajas de usar especímenes de concreto y un muy bajo factor de dilución.

El incremento en la cantidad de material puzolánico empleado en estructuras de concreto y su uso en aplicaciones no marinas son esperados debido al éxito del concreto de cemento mezclado en aplicaciones marinas (Sagüés y Powers 1997). Como la reacción puzolánica consume la reserva alcalina del concreto, las nuevas estructuras de concreto que contienen materiales puzolánicos probablemente se vuelvan susceptibles a una carbonatación rápida. Aunque se han realizado pruebas de pH en pastas (Moreno 2001) y morteros (Goñi *et al.* 1997) puzolánicos carbonatados, aún no se realiza la prueba en concreto carbonatado. De acuerdo a estos trabajos, el pH de la solución del poro del concreto podría estar en función de la reserva alcalina, por lo que el pH sería menor en el caso de materiales puzolánicos carbonatados. Adicionalmente, a menor valor de pH le corresponde una mayor velocidad de corrosión, información que no puede proporcionar la prueba de la fenolftaleína. Por lo tanto, el objetivo de esta investigación es determinar el pH de la solución del poro del concreto carbonatado hecho de cemento mezclado por medio

del método de LIS y su correlación con la velocidad de la corrosión.

METODOLOGÍA

Los especímenes para obtener el pH por LIS fueron obtenidos de cilindros de concreto (75mm de diámetro, 150 mm de longitud) preparados con cementos puzolánicos. Dichos cilindros fueron preparados de acuerdo a las normas ASTM, con respecto a los materiales, y el procedimiento del ACI con respecto al diseño de mezclas. Estos cilindros de concreto fueron parte de un proyecto destinado a determinar el comportamiento a la carbonatación del concreto de altas prestaciones de cemento puzolánico, de los tipos más usados en ambientes marinos agresivos. Las características de las mezclas de concreto son presentadas en la Tabla 1. Fueron utilizados cemento Portland ordinario (0.49% Na equiv.), ceniza volante clase “F” (0.72% Na equiv.), y humo de sílice (Moreno 1999).

Como parte de una investigación paralela acerca del comportamiento frente a la corrosión de barras de refuerzo en concreto carbonatado (Moreno y Sagüés 1998), fueron colados especímenes de concreto reforzado usando las mismas mezclas de concreto. Los especímenes tuvieron forma prismática, 50 mm por 100 mm por 200 mm, con 2 barras de refuerzo paralelas del # 3 sobresaliendo de la parte de arriba. Las barras de refuerzo fueron coladas con una separación de 50 mm en los especímenes de concreto. Un electrodo interno de referencia, hecho de una barra de titanio activado, fue embebido en el centro de cada espécimen de concreto (Castro *et al.* 1996).

Después de desmoldados, los especímenes de concreto fueron puestos a madurar bajo las condiciones de laboratorio por más de un año antes de que fueran expuestos a un ambiente rico en dióxido de carbono (~4%) con el fin de acelerar el proceso de carbonatación (Ho y Lewis 1987). Para obtener la concentración de CO₂ y la humedad relativa (HR) deseada dentro de la cámara, fue usada una mezcla de flujo de dióxido de carbono puro y aire a 2 diferentes niveles de humedad. Las velocidades de flujo del aire seco y húmedo fueron ajustadas periódicamente para mantener una HR del 60%±5% en la cámara. En consecuencia, la velocidad de flujo del CO₂ fue ajustada (Moreno 1999). Los especímenes (por triplicado) fueron expuestos por 200 días, excepto por los especímenes hechos con mezclas de 50CV2 y 35CV que fueron expuestos por 300 días para lograr una mayor carbonatación. Cilindros de control de concreto (por duplicado) fueron usados para determinar el pH del agua del poro del concreto antes de la carbonatación. La profundidad de la carbonatación fue determinada en 3 momentos diferentes a lo largo de la exposición acelerada en ambos tipos, los cilindros expuestos y los que no estuvieron expuestos, y al fin del experimento en los cilindros expuestos. El análisis de los resultados con respecto al proceso de carbonatación fue motivo de otra publicación (Moreno y Sagüés 2001). La determinación de la profundidad de carbonatación al final de la prueba a la exposición acelerada en dos de los tres especímenes fue usada sólo para verificar el progreso de la carbonatación.

Tabla 1. Proporciones de las Mezclas

Mezcla	Composición	Agua/cementante	Resistencia a la compresión a 28 días (MPa)
0CV	Sin ceniza volante	0.37	39
20CV	20% ceniza volante	0.37	47
20CVAC	20% ceniza volante	0.50	35
20CV8HS	20% ceniza volante + 8% de humo de sílice	0.37	47
35CV	35% ceniza volante	0.37	42
50CV1	50% ceniza volante	0.37	43
50CV2	50% ceniza volante y mayor período de curado	0.37	37

El pH de la solución del poro del concreto fue estimado usando la técnica de LIS descrita por Sagüés *et al.* (1997). La rodaja de concreto de la muestra tenía un mínimo de 50 mm de espesor y fue obtenida

de un cilindro de concreto utilizando una sierra lubricada con agua. Esta muestra de concreto fue mantenida en una cámara con una humedad relativa del 100% por ~30 días. Una vez que la muestra del

concreto alcanzó un pH constante, se le hicieron 3 hoyos, de ~6 mm de diámetro y 25 mm de profundidad, perpendiculares a la superficie plana del concreto (Figura 1).

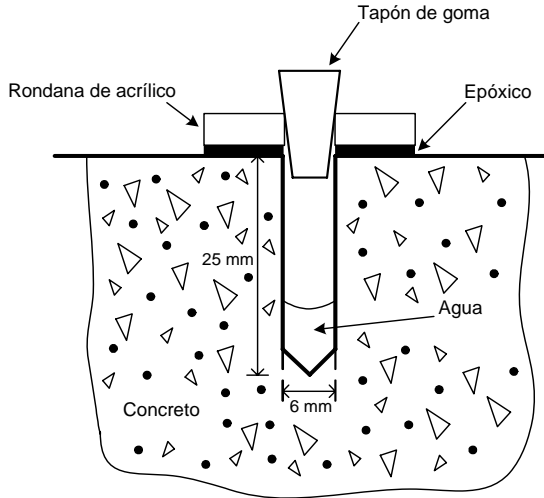


Figura 1. Diagrama del arreglo para la prueba de lixiviación in-situ.

En los especímenes no expuestos, los hoyos fueron hechos a la misma distancia ($r/2$) de la cara circular del cilindro. En los especímenes expuestos, los hoyos fueron hechos a diferentes distancias (Figura 2). En cada hoyo fueron pipeteados 0.4 cm^3 de agua destilada. El pH del agua fue periódicamente determinada in-situ con un microelectrodo de pH calibrado en soluciones tampón de alto pH, y acoplado a un medidor de mV/pH con una resolución de 1 mV. El valor de pH (con una incertidumbre de ± 0.2 unidades) fue monitoreado por un período de tiempo (generalmente 15 días) hasta que fue observado un valor terminal de pH aparente. Un valor nominal promedio de pH para cada mezcla de concreto no expuesta fue obtenido del valor terminal de pH en cada uno de los 3 hoyos hechos en la misma rodaja.

RESULTADOS

Los resultados de la determinación del pH antes y después de la exposición a la carbonatación acelerada son presentados en la Tabla 2. Los especímenes no expuestos mostraron valores de pH comprendidos en

el rango 12.9 a 13.1, suficientemente alto sobre el pH de la solución de hidróxido de calcio saturado (~12.5). En especímenes de concreto completamente carbonatados, los valores del pH fluctuaron en un rango de 8 a 9.8 (mezclas 20CVAC, 20CV8HS, 50CV1, y 50CV2).

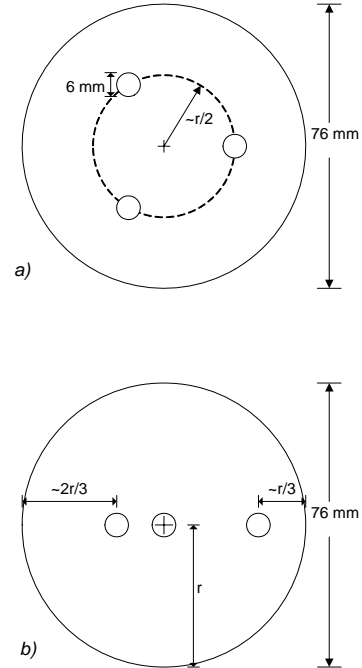


Figura 2. Diagrama de la posición de los hoyos, con respecto al borde del cilindro, para la determinación de pH.
a) especímenes no carbonatados; b) especímenes carbonatados.

Sin embargo, en especímenes de concreto parcialmente carbonatados, los valores de pH fluctuaron en un rango de 9.5 a 10 en la región carbonatada, de 10.4 a 10.8 en la vecindad del frente de carbonatación (definida por la prueba de la fenolftaleína), y de 10.4 a 12.5 en la región que no estaba carbonatada (mezclas 20CV y 35CV). La extensión de la carbonatación de la mezcla 0CV al final de la prueba de exposición acelerada no fue determinada ya que presentó regiones rosadas encima del fondo incoloro al momento de efectuar la prueba.

Tabla 2. Valores de pH de la solución del poro de especímenes expuestos y no expuestos a CO₂

Mezcla	No expuestos	Expuestos a CO ₂			Promedio de carbonatación
		@ 13 mm [†]	@ 20~26 mm [†]	@ 37 mm [†]	
0CV	12.9	11.8	12.4	12.4	N. D. [§]
20CV	13.2	10.0	10.8	12.5	29 mm [‡]
20CVAC	13.1	9.0	9.8	9.5	Completa
20CV8HS	12.9	8.5	8.5	8.5	Completa
35CV	13.1	9.5	10.4	10.4	28 mm [‡]
50CV1	12.9	8.0	8.0	8.0	Completa
50CV2	12.9	8.2	8.0	8.0	Completa

[†] Distancia a la cara circular del cilindro.

[‡] Prueba de fenolftaleína.

[§] No determinada.

DISCUSIÓN

La Figura 3 muestra la correlación entre el pH del agua del poro y el contenido de cemento de los especímenes no carbonatados. Para las mezclas con similares características (20CV, 35CV, 50CV1 y 50CV2), el pH decrece con la reducción del contenido del cemento. Sin embargo, los valores del pH de las mezclas con 20% y 35% de ceniza volante fueron más altos que en las mezclas de cemento normal. La ceniza volante utilizada en esta investigación tiene un contenido más alto de álcalis que el cemento Portland. Como la disolución de la ceniza volante depende de la composición del agua del poro durante la hidratación (Bijen y Pietersen 1994), el alto contenido de cemento (≥65%) fue suficiente para disolver las partículas de ceniza volante, resultando en un pH más alto en mezclas con 20% y 35% de ceniza volante. La diferencia de pH entre las mezclas 20CV y 20CVAC es consistente con los resultados de Bijen y Pietersen (1994), los cuales encontraron que la alcalinidad incrementa cuando la relación agua/cemento se reduce.

Los resultados indicaron que en los casos cuando el espécimen de concreto estuvo completamente carbonatado, de acuerdo a la prueba del indicador de color, los valores de pH de la muestra fueron bastante constantes y fluctuaban en un rango de 8 a 9.8 unidades. La Figura 4 muestra la correlación entre el pH del agua del poro y el contenido de cemento, en donde se observa una disminución del pH conforme se reduce el contenido de cemento en el concreto. Estos resultados son consistentes con los resultados obtenidos en morteros por Goñi *et al.* (1997). Los morteros tenían una relación 1:3 arena-material cementante, y una relación agua-material cementante de 0.50. En esa investigación, ellos encontraron que, después de una exposición de 365 días en una cámara de CO₂ al 5%, el pH de la solución de poro fue, respectivamente, de 12.1, 9.6, 9.7 y 8.7 para morteros con 0%, 15%, 35% y 50% de ceniza volante. Los resultados también son consistentes con los resultado obtenidos previamente en pastas de cemento puzolánico (Moreno 2001). En ese caso se obtuvo un valor de pH entre 8.7 y 9.1 para pastas con 50% de ceniza volante.

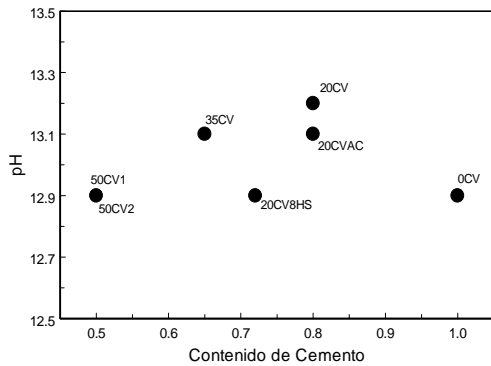


Figura 3. pH del agua del poro de especímenes no carbonatados en función del contenido de cemento.

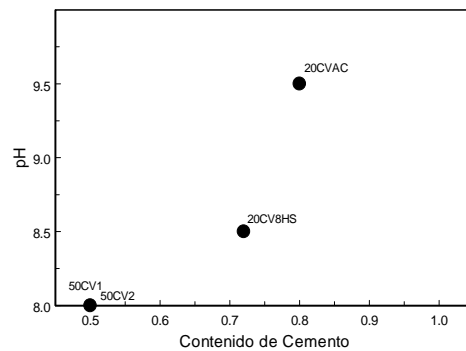


Figura 4. pH del agua del poro de especímenes completamente carbonatados en función del contenido de cemento.

Los resultados de la investigación paralela sobre la corrosión de las barras de refuerzo en concreto carbonatado (Moreno y Sagüés 1998), mostraron que los valores más altos de velocidad de corrosión fueron obtenidos en barras de refuerzo embebidas en la mezcla 50CV1 ($0.4 \mu\text{A}/\text{cm}^2$), seguida por las barras de refuerzo en mezclas 20CVAC y 20CV8HS ($0.2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$). Estos resultados se correlacionan con los valores de pH obtenidos de estas mezclas, ya que, la mezcla con el mayor índice de corrosión tenía el menor valor de pH del agua del poro. Tomando $0.2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ como un umbral sugerido para una corrosión activa en concreto (Andrade y Alonso 1994), las propiedades mejoradas del concreto, obtenidas usando un alto contenido de ceniza volante, pueden ser anuladas por la alta susceptibilidad a desarrollar corrosión en ambientes propios para la carbonatación. Debe ser enfatizado que éste sería el peor escenario para mezclas puzolánicas protegidas de la lluvia, y por lo tanto, privadas de un curado natural, como es el caso de los elementos de concreto en interiores.

En los casos en que la carbonatación del espécimen fue incompleta, como en las mezclas 35CV y 20CV, el rango de valores de pH fluctuó entre 9.5 y 10.8 en la región carbonatada y entre 10.4 y 12.5 en la región no carbonatada. Una posible explicación para esos valores de pH en la región carbonatada, más altos de lo que se esperaba (>8.5 unidades, según la prueba de la fenolftaleína), puede ser la siguiente: Cuando la carbonatación acelerada terminó, y la muestra de concreto fue, posteriormente, saturada con agua, iones alcalinos podrían haber difundido de la parte interior de la rodaja, elevando el pH en la región carbonatada. Otra posibilidad puede ser que, cuando se taladró el hoyo para la medición de pH, algunos granos de cemento anhidro quedaron expuestos. Después de la reacción de hidratación con el agua añadida, los componentes hidratados pudieron subir el valor de pH en las inmediaciones del hoyo. Una tercera posibilidad podría ser una carbonatación incompleta en la región carbonatada, como es mencionado por González y Andrade (1980), y observado en la mezcla 0CV. Entonces, cuando la exposición al CO_2 se detuvo, los iones de Ca de las regiones no carbonatadas del concreto pudieron llegar a la solución, subiendo el pH.

Con respecto a los valores de pH más bajos que los esperados (≤ 12.5 unidades) en las regiones no carbonatadas, hay al menos tres posibles explicaciones. La primera posibilidad podría ser debida al fenómeno conocido como *fijación de álcalis*. Constantiner (1994) reportó esta fijación de álcalis cuando encontró que los álcalis de la solución

del poro disminuyeron después de que el espécimen de concreto experimentó un período de secado. Después de humedecer el concreto, algunos de los álcalis fueron disueltos de nuevo en la solución del poro, pero la concentración original no fue alcanzada, por lo tanto, el pH se mantuvo menor que antes del secado. Una segunda posibilidad para el bajo valor de pH puede ser la carbonatación parcial de la solución del poro, adelante del frente de carbonatación definido por la fenolftaleína. Debido a esta carbonatación parcial, la cantidad de álcalis pudo haber sido reducida de su concentración inicial, pero permaneciendo suficientemente alta para reaccionar con la solución de fenolftaleína. La tercera posibilidad podría ser que, el bajo valor de pH se deba al flujo de los iones álcali de la región de alta concentración (no carbonatada) a la región de baja carbonatación (carbonatada). Si se dejase transcurrir un tiempo suficiente, la concentración de álcalis en la solución del poro podría alcanzar una concentración estable dentro del concreto sin importar si la región es carbonatada o no carbonatada. Estas posibles explicaciones no son mutuamente excluyentes, así que la explicación para los valores de pH, menores que los esperados en la región no carbonatada, puede deberse a una combinación de las tres.

CONCLUSIONES

- Los valores del pH de la solución del poro del concreto antes de la carbonatación son mayores que el pH de una solución saturada de hidróxido de calcio.
- Los valores del pH de la solución del poro después de la carbonatación fluctuaron entre 8 y 9.8 unidades. El valor final incrementa cuando disminuye la cantidad de puzolanas presentes en el material cementante.
- Los valores del pH obtenidos en concreto carbonatado son consistentes con los obtenidos en pastas y morteros carbonatados.

RECONOCIMIENTOS

Esta investigación fue parcialmente financiada por el Departamento de Transporte de Florida, el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT-México), la Universidad del Sur de Florida, y la Universidad Autónoma de Yucatán. Las opiniones, hallazgos y conclusiones son del autor y no necesariamente de las organizaciones participantes. Asimismo, la asesoría y las valiosas discusiones del Prof. Distinguido Dr. A. A. Sagüés de USF son gratamente apreciadas.

BIBLIOGRAFÍA

- Andersson, K., Allard, B., Bengtsson, M., and Magnusson, B. (1989) "Chemical composition of cement pore solutions," *Cement and Concrete Research*, Vol. 19, pp. 327-332.
- Andrade, C., and Alonso, C. (1994) "Values of corrosion rate of steel in concrete to predict service life on concrete structures," in *Application of Accelerated Corrosion Tests to Service Life Prediction of Materials*, ASTM STP-1194, G. Cragolino and N. Sridhat, eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, Pa., pp. 282-295.
- Arya, C., and Newman, J. B. (1990) "An assessment of four methods of determining the free chloride content of concrete," *Materials and Structures*, Vol. 23, No. 137, pp. 319-330.
- Barneyback, R. S., and Diamond, S. (1981) "Expression an analysis of pore fluids from hardened cement pastes and mortars," *Cement and Concrete Research*, Vol. 11, 1981, pp. 279-285.
- Bijen, J., and Pietersen, H. (1994) "Mineral admixtures: Reactions, microstructure and macro-properties," in *Advances in Cement and Concrete*, M. W. Grutzeck and S. L. Sarkar, eds., American Society of Civil Engineers, New York, NY., pp. 292-328.
- Castro, P., Sagüés, A. A., Moreno, E. I., Maldonado, L., and Genescá, J. (1996) "Characterization of activated titanium solid reference electrodes for corrosion testing of steel in concrete" *Corrosion*, Vol. 52, No. 8, pp. 609-617.
- Constantiner, D. (1994) "Factors affecting concrete pore solution: A) alkali fixation induced by drying and carbonation, and B) alkali released from feldspars" Ph.D. Dissertation, *Purdue University*.
- Diamond, S. (1981) "Effects of two Danish fly ashes on alkali contents of pore solutions of cement-fly ash pastes," *Cement and Concrete Research*, Vol. 11, pp. 383-394.
- González, J. A., Andrade, C. (1980) "Relaciones cuantitativas entre la carbonatación del concreto y la corrosión del refuerzo," *Corrosión y Protección*, Vol. 11, pp. 15-24.
- Goñi, S., Alonso, C., Menéndez, E., Hidalgo, A., and Andrade, C. (1997) "Microstructural characterization of the carbonation of mortars made with fly ash," Proceedings of the 10th International Congress on the Chemistry of Cement, Justnes, H., ed., Vol. 4, Paper 4iv004, Gothenburg, Sweden.
- Grimes, W. D., Hartt, W. H., Tumer, D. H. (1979) "Cracking of concrete in sea water due to embedded metal corrosion," *Corrosion*, Vol. 35, pp. 309-316.
- Ho, D. W. S., and Lewis, R. K. (1987) "Carbonation of concrete and its prediction," *Cement and Concrete Research*, Vol. 17, pp. 489-504.
- Moreno, E. I. (1999) "Carbonation of blended-cement concretes," Ph.D. Dissertation, *University of South Florida*, Tampa, Florida.
- Moreno, E. I. (2000) "La corrosión del acero de refuerzo inducida por la carbonatación del concreto," *Ingeniería-Revista Académica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán*, Vol. 4, No. 2, pp. 43-48.
- Moreno, E. I. (2001) "Valores de pH de la pasta de cemento puzolánico carbonatado," *Ingeniería-Revista Académica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán*, Vol. 5, No. 1, pp. 33-38.
- Moreno, E. I., and Sagüés, A. A. (1998) "Carbonation-induced corrosion of blended-cement concrete mix designs for highway structures" *Corrosion/98*, Paper No. 636, NACE International, Houston, Tx., 10p.

Moreno Eric, I. / Ingeniería 10-3 (2006) 5-12

- Moreno, E. I., and Sagüés, A. A. (2001) "Impacto de la ceniza volante en la durabilidad de estructuras de concreto en medios no marinos: Resistencia a la carbonatación", *COLLOQUIA 2001*, Madrid, España, pp. 145-152.
- Sagüés, A. A., and Powers, R. (1997) "Corrosion and corrosion control of concrete structures in Florida-What can be learned?" in *Repair of Concrete Structures*, A. Blankvoll, ed., Norwegian Road Research Laboratory, Oslo, Norway, pp. 49-58.
- Sagüés, A. A., Moreno, E. I., and Andrade, C. (1997) "Evolution of pH during in-situ leaching in small concrete cavities," *Cement and Concrete Research*, Vol. 27, pp. 1747-1759.

Este documento se debe citar como:

Moreno Eric I. (2006). **Determinación del pH de la solución de los poros de concreto después de un proceso acelerado de carbonatación.** Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY, 10-3, pp.5-12, ISSN: 1665-529X