

ESTUDIO DE LA CARBONATACIÓN DEL HORMIGÓN ARMADO EN ZONAS REVENIDAS, PARA PREVENIR RIESGOS DE CORROSIÓN.

Ocampo, I^{*}; Vuanello, O; Ortúzar, R; Seminara, H; Paez, G; Ibarbe, I; Bustos, S; Vila, R.

Universidad Nacional de San Juan Facultad de Ingeniería
Av. Libertador General San Martín (oeste) 1109 San Juan -Argentina
e-mail responsable: iocampo@unsj.edu.ar

RESUMEN

Las construcciones de hormigón armado, ubicadas en la región del Valle de Tulum San Juan Argentina, cuyo suelo se le denomina revenido por poseer las napas freáticas elevadas, son afectadas principalmente por el proceso de carbonatación del hormigón, ocasionando corrosión electroquímica en el acero de refuerzo, con los consecuentes daños estructurales. La carbonatación es un proceso difusional, que requiere de varios años para obtener una importante extensión de las reacciones de neutralización de la portlandita, situación que da inicio al proceso de corrosión del acero del hormigón armado.

El objetivo del trabajo fue proporcionar las bases para el diseño, construcción y funcionamiento de una cámara de carbonatación acelerada, que permita en corto tiempo, estudiar el fenómeno de carbonatación en medios agresivos, proceso desencadenante de la corrosión electroquímica generalizada de las armaduras y poder así prevenir los riesgos de colapso de las estructuras afectadas.

El equipo de carbonatación acelerada construido, mostró un grado de efectividad aceptable; ya que a igualdad de tiempo de registro del frente carbonatado, un 10% de las probetas sometidas al proceso de envejecimiento, no mostraban la misma o similar profundidad de carbonatación; se considera que se debe monitorear en la cámara más eficientemente la circulación del aire húmedo y enriquecido con anhídrido carbónico, para que el medio gaseoso sea el mismo para todas las probetas.

Se comprobó cualitativamente con medida de potencial, que el frente carbonatado había llegado al acero ocasionándole corrosión electroquímica en un tiempo muy corto, en comparación con los especímenes control cuya probabilidad de corrosión, a igualdad de tiempo de exposición en ambiente normal, es prácticamente nulo, por lo que se concluye que el equipo de carbonatación acelerada, es válido para estudios de carbonatación del hormigón armado, para prever procesos de corrosión electroquímica.

Como era de esperar el comportamiento del hormigón con menor relación W/C es mejor que el de mayor relación, ya que a igualdad de tratamiento, el primero presenta mayor porosidad, lo que implica aumento de difusión del anhídrido carbónico, en consecuencia el frente carbonatado tarda menos en llegar al acero del refuerzo y generar corrosión electroquímica.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de investigación surge de la necesidad de realizar una evaluación de la calidad del hormigón, utilizado en edificaciones construidas en zonas revenidas, en cuanto a mantener su capacidad de constituir una barrera física y química, que proteja al acero de la corrosión electroquímica, provocada por las condiciones medioambientales agresivas.

La corrosión electroquímica de la armadura inducida por un proceso de carbonatación, constituye una de las principales causas, responsables del deterioro de las estructuras de hormigón armado, especialmente aquellas situadas en zonas revenidas [1]. Se estima que los costos por corrosión en los países industrializados están entre el 4 y el 5 por ciento del PBI [2], y el costo en desgracias personales no es cuantificable. Constituye por si mismo un problema que requiere de una constante búsqueda de procedimientos, para evaluar la calidad de los hormigones, para mejorar y dar a conocer nuevos métodos de protección y mantenimiento de estructuras de hormigón armado en ambientes agresivos.

Teniendo en cuenta que los procesos de corrosión del acero en el hormigón armado pueden ser muy variados en cuanto al tiempo que demoran, pero nunca son menores a un año y en la mayoría de los casos, la causa de una patología puede aparecer después de cinco o más años; que resulta muy difícil estudiar el comportamiento de los materiales de construcción puestos en obra y que la iniciación de la corrosión generalizada no puede evaluarse por simple inspección visual, se diseñó, construyó y se puso en funcionamiento un sistema de penetración acelerada de CO₂ a nivel de laboratorio. Con los resultados obtenidos se puede aconsejar sobre la conveniencia, o no, de la utilización del hormigón de uso común en zona de revenición, con el fin de evitar deterioros prematuros del bien inmueble por envejecimiento debido al proceso de carbonatación y posterior corrosión electroquímica. También se puede evaluar la efectividad de cualquier nuevo material o procedimiento, que ofrezca protección adicional contra la corrosión electroquímica por carbonatación del hormigón, entre los cuales se puede mencionar el reemplazo de acero de refuerzo por materiales más resistentes a la corrosión, aplicación de recubrimientos a la barra, y/o hormigón, inhibidores de corrosión, otros.

La corrosión de la armadura del hormigón armado se debe principalmente a la acción de dos agentes, por un lado los cloruros en el hormigón, que podrían estar presentes desde la elaboración del mismo o haber ingresado desde el exterior, al llegar a la armadura de acero, la despasivan localmente, restándole efectividad a la defensa natural que le confiere el hormigón; generando corrosión localizada. Por otro lado la carbonatación, es el CO₂ de la atmósfera que difunde a través del hormigón y reacciona con los componentes alcalinos, de la fase acuosa del cemento hidratado; produciendo una disminución abrupta de pH con la aparición de una región neutralizada, llamada frente carbonatado, que al llegar al acero del refuerzo destruye la pasividad de éste, si existen condiciones adecuadas de humedad y temperatura, produciendo corrosión generalizada [3]. Los productos de esta corrosión son óxidos expansivos, iniciando la formación de grietas en el hormigón.

Estos dos fenómenos han sido exhaustivamente estudiados, pero como ambos son procesos controlados por difusión, su estudio requiere de la inversión de mucho tiempo y esfuerzo para la obtención de resultados. Por esto, desde hace algunos años se han realizado muchas investigaciones en equipos para pruebas, artificialmente aceleradas [4,5], de ataque de los agentes agresivos mencionados, con el objeto de obtener información rápida y segura de estos dos fenómenos. El relativo éxito alcanzado con tales pruebas aceleradas, ha motivado a distintos investigadores a seguir en la búsqueda de nuevos procesos o procedimientos que permitan alcanzar un máximo grado de correlación, entre las

experiencias realizadas en condiciones controladas en el laboratorio, y las situaciones de deterioro del hormigón armado en ambientes naturales.

Como ya se mencionó, el proceso de carbonatación comienza cuando el CO₂ gaseoso de la atmósfera penetra en el hormigón, a través de su red de poros. El anhídrido carbónico se disuelve en la solución alcalina que llena estos poros y reacciona con los iones calcio (Ca⁺⁺) presentes en la misma, formando carbonato de calcio (CaCO₃) (compuesto muy insoluble). Esta reacción remueve los iones calcio (Ca⁺⁺) de la solución de poro, y el valor del pH disminuye de cerca de 12,5 hasta aproximadamente 8,0. Por esto, la carbonatación también es llamada neutralización [6].

La velocidad de carbonatación es el cambio con el tiempo de la profundidad del frente carbonatado dentro del hormigón. La carbonatación bajo condiciones atmosféricas normales está principalmente afectada por el contenido de cemento en la mezcla de concreto, por la porosidad del hormigón y por el grado de saturación de agua dentro de los poros del mismo [3].

La porosidad del concreto se debe a la cantidad de espacios vacíos por unidad de volumen de hormigón, que se forma después que se ha evaporado todo el exceso de agua agregado, o a consecuencia de aire atrapado durante el llenado, en consecuencia mientras mayor es la relación de agua a cemento (a/c) en la mezcla de hormigón, mayor será la porosidad resultante del mismo, y mayor también el camino libre para la difusión del CO₂ al interior de la masa del hormigón, resultando en un incremento de la velocidad de penetración del frente de carbonatación [7].

La humedad o saturación de agua juega un papel opuesto en la carbonatación del hormigón. Una abundancia de agua puede inhibir el proceso de carbonatación por la disminución del coeficiente de difusión efectiva de gases en el hormigón [3]. Mientras que muy poca agua puede prevenir el proceso de carbonatación debido a la falta de medio acuoso para la reacción. Algunos investigadores han determinado un rango entre 50% a 70% de humedad relativa como el más conveniente.

La mayoría de las ecuaciones que describen el progreso de la carbonatación del hormigón como función del tiempo, están basadas en las leyes de Fick [8, 9], que para el caso que se está tratando toma la forma: $x_c = k t^{1/2}$ en la que: x_c es la profundidad de la carbonatación, k es el coeficiente de carbonatación y t es el tiempo. Los ensayos de carbonatación acelerados se basan en la aplicación de esta ecuación que relaciona la profundidad de penetración de la carbonatación (x_c) con el tiempo (t). Si se expone una determinada probeta de hormigón a la atmósfera natural, donde la concentración de CO₂ en promedio es 0,035% molar [3], se obtendrá un tiempo $t_{(0,035\%)}$ necesario para alcanzar la penetración a una profundidad x , si la misma probeta se expone a una concentración exterior de CO₂ mucho mayor (por ejemplo 4% molar), el tiempo necesario para alcanzar esta misma profundidad de carbonatación será aproximadamente 100 veces menor que el anterior. Investigaciones realizadas usando un ambiente a 4% [10], concluyeron que aún a estas altas concentraciones la profundidad de carbonatación mantiene su relación proporcional con la raíz cuadrada del tiempo. Sin embargo, otras investigaciones realizadas con altas concentraciones de CO₂ [11], advierten que se deben tomar precauciones cuando se extrapolen los resultados de pruebas aceleradas a ambientes atmosféricos normales.

La medida de la profundidad del frente carbonatado, x_c , se realiza, usualmente, aplicando la técnica de la fenolftaleína, indicador que tiene un rango de viraje en los pH del hormigón carbonatado y sin carbonatar. Las condiciones dentro de la cámara fueron de 65% de humedad relativa, concentración 4% M de CO₂ y temperatura de 27°C.

CONDICIONES EXPERIMENTALES

Preparación de probetas

Se confeccionaron dos tipos de probetas, sesenta probetas cilíndricas (ϕ : 100 mm, h: 200 mm) en las que se efectuaron ensayos de resistencia a la compresión y profundidad de carbonatación y diez probetas prismáticas (50 mm, 50mm, 200mm, con un acero central ϕ : 42 mm) las que fueron utilizadas para medir el potencial, de manera de seguir el proceso de corrosión.

La dosificación del hormigón para el llenado de las probetas se realizó aplicando el Método del A.C.I., utilizando las tablas correspondientes. Para los agregados se siguió la norma argentina CIRSOC 201, capítulo 4, en función de las curvas límites correspondientes. Se utilizó cemento Pórtland Normal (CPN 30). En la tabla 1 se consignan algunas propiedades del cemento, arena y grava utilizados. Se realizaron las determinaciones granulométricas de los áridos empleados: arena y grava, en la tabla 2 y a modo de ejemplo se registra la granulometría de la arena. Se adoptó por diseño dos relaciones agua-cemento: $W/C = 0.45$ y $W/C = 0.55$

Tabla 1. Propiedades del cemento, arena y grava.

Materiales	Peso específico	Peso unitario	Contenido de humedad	Absorción (%)
Cemento	3.15	1.27	-	-
Arena	2.7	1.7	5	1.4
Grava	2.67	1.66	0.1	0.35

Tabla 2 Granulometría de la arena utilizada.

Material	Tamiz	% Pasa	% Ret. acum.	(%) Retenido
A R E N A	# 4	100	0	0
	# 8	90	10	10
	#16	75	25	15
	#30	60	40	15
	#100	2	98	58
	#200	0	100	2

Además se realizó la estimación del diámetro nominal, resultando $D_{\text{máx}} = \frac{3}{4}$ " y de asentamiento $S = 7$ cm.

En función de las relaciones adoptadas y de las curvas de Abrams se estimaron las resistencias mínimas de compresión, para $W/C = 0.45$ hormigón H30, $\sigma'_{bk} = 30$ MPa y para $W/C = 0.55$ hormigón H30, $\sigma'_{bk} = 21$ MPa, la cantidad de agua de amasado $W = 183$ l/m³, considerando canto rodado; el volumen de aire naturalmente incorporado $1.5\% V = 15$ l/m³ y la cantidad de cemento para ambas relaciones W/C , $W/C = 0.45 - C = 406$ kg/m³; $W/C = 0.55 - C = 332$ kg/m³, donde ambas cantidades de cemento son mayores que el mínimo

establecido por la Norma CIRSOC en función del ambiente en el que estará expuesto el hormigón que se diseña.

Acondicionamiento de probetas

A las probetas construidas se las dejó sumergidas en agua por un período de 7 días, proceso de fragüe, y posteriormente se las aclimató durante 100 días, en condiciones de laboratorio (temperatura 27°C, 65% de humedad relativa) con el fin de obtener un hormigón más maduro. Al cabo del período de aclimatación se midió la profundidad de carbonatación considerada en cálculos posteriores como inicial, $x_{0,035\%}$. La mitad de las probetas construidas se las dejó en el laboratorio, denominándolas probetas de control, y al resto se las ubicó en la cámara.

Técnica de la fenolftaleína

Para medir la profundidad de carbonatación se aplicó la técnica de la fenolftaleína, que consiste en aplicar una solución de reactivo al 1% en alcohol, a una tajada de la probeta obtenida por corte con cincel y martillo. Como se muestra en la fotografía 1, la zona coloreada indica alcalinidad y la restante indica el avance de la carbonatación que acidifica el hormigón, medio en el cual la fenolftaleína es incolora.



Fotografía 1. Imagen fotográfica que muestra la aplicación de fenolftaleína a una tajada de probeta.

Se realizaron ocho mediciones radiales, a tiempos programados, siendo el promedio el valor registrado como xc.

Medida de potencial

A las probetas prismáticas se les midió el potencial de corrosión, aplicando la norma (ASTM C-876 (1987)) [12], que utiliza como electrodo de referencia el de Cu/CuSO₄. El valor del potencial registrado permite estimar la posibilidad de corrosión, según el criterio explicitado en la misma, registrado en la tabla 3:

Esta técnica es cualitativa, informa sobre el riesgo de corrosión, pero no su actividad real.

Tabla 3: Evaluación del riesgo de corrosión según ASTM C-876

Potencial de corrosión (V vs. Cu/CuSO ₄)	Probabilidad de Corrosión
>-0.200	<10 %
-0.200 a -0.350	Incierto
<-0.350	>90 %

Cámara de carbonatación

En el diseño de la cámara de carbonatación, se tuvo en cuenta aquellas condiciones que debía reunir el sistema en conjunto, para cumplir con los objetivos previstos tales como, el de mantener condiciones estables y constantes en el tiempo de humedad relativa, temperatura y concentración de anhídrido carbónico que ingrese al hormigón, para producir el efecto deseado de carbonatación del mismo en corto tiempo. Al cabo del cual se analiza el comportamiento del hormigón, y la presencia o no de corrosión electroquímica generalizada en el acero, usado en la probeta.

El tamaño responde a la necesidad de que las probetas a colocar estén ubicadas de tal forma que el flujo de aire con una humedad del 65%, enriquecido en CO₂, 4 % M, entre en contacto con la superficie exterior de todas las probetas, espaciadas éstas de tal forma que el flujo de aire sea libre. Además dentro de la misma en la parte superior va un deflector, en la base un ventilador, tubos de acero AISI 304, perforados que actúan como difusores de la corriente gaseosa y una parrilla de acero AISI 304 donde se colocaron las probetas. El cálculo dio que la cámara debía tener las siguientes medidas: 120 cm de frente, 60 cm de profundidad y 60 cm de altura. En el esqueleto se empleó acero AISI 304, las paredes laterales y la base se utilizó vidrio (6 mm) y la tapa superior fue realizada en acrílico (6 mm).

El requerimiento de aire fue aportado por un compresor. El flujo de aire se controla con sistema de válvula triple, una check para asegurar presión dentro del aparato, otra efecto compuerta y una tercera de aguja con reducción para control de flujo a la salida. Además se dispuso un rotámetro para medir el flujo de aire, que ingresa a un humidificador para lograr la humedad necesaria. El aire con 65% de humedad relativa se mezcla con el anhídrido carbónico, proveniente de un cilindro, e ingresa a la cámara distribuyéndose a través de los difusores.

El contenido de humedad y temperatura en la cámara se monitorea con un higrómetro, colocado en la tapa de la cámara.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con la medida de la profundidad de carbonatación obtenida al cabo del período de aclimatación se calcula el coeficiente de carbonatación del hormigón correspondiente a ese período, utilizando la ecuación $x_c = k t^{1/2}$ (1).

Reemplazando en la ecuación (1), el valor de k obtenido, se estima el tiempo, $t_{0.035\%}$, necesario para que a una concentración de CO₂ de 0.035%, el frente carbonatado haya penetrado 25 mm, es decir llegue al acero de la probeta prismática.

Utilizando la expresión $\frac{t_{4\%}}{t_{0.035\%}} = \sqrt{\frac{C_1}{C_2}}$ [3] en la que C₁ y C₂ se refieren a concentración de CO₂

de 4% y 0.035% respectivamente, se estima el tiempo necesario para que la profundidad de

carbonatación sea 25 mm, en las probetas colocadas en la cámara.

En la tabla 4 se muestran los valores, estimados por cálculos y sólo los medidos al final del ensayo experimental, de los tiempos de exposición en la cámara de carbonatación, para lograr que el frente carbonatado llegue al acero; lo que se verificó de acuerdo a una programación de medidas del frente carbonatado, una por día de cada espécimen control y carbonatado, de las dos relaciones W/C ensayadas. En la tabla 5 sólo se consignan valores de potencial de corrosión, de las probetas prismáticas control y las ubicadas en la cámara, leídos al cabo de 13 días, para la dos relaciones W/C utilizadas.

Tabla 4. Valores de tiempo de exposición estimado y real en la cámara de carbonatación.

Tiempo [días] estimado		Tiempo [días] real	
a/c	a/c	a/c	a/c
0.45	0.55	0.45	0.55
11.16	8.11	13.00	9.00

Tabla 5. Medida de potencial en probetas prismáticas sometidas al proceso de carbonatación y en ambiente de laboratorio.

ΔV [mV] probetas control (Cu/CuSO ₄)		ΔV [mV] probetas carbonatadas (Cu/CuSO ₄)	
a/c	a/c	a/c	a/c
0.45	0.55	0.45	0.55
- 20	- 45	- 1000	-1100

Los valores consignados en la tabla 4 muestran que el diseño y posterior construcción de la cámara de carbonatación, es aceptable en cuanto a que en un lapso de tiempo muy corto se logró envejecer el hormigón. En la tabla 5 los valores de potencial registrados para las probetas carbonatadas, evaluados en función de la Norma ASTM C-876, superan ampliamente al valor correspondiente a una probabilidad de corrosión del 90%, mientras que los obtenidos en las probetas control, exhiben que la probabilidad de corrosión electroquímica en ese estadio es prácticamente nula.

CONCLUSIONES

El equipo de carbonatación acelerada construido, mostró un grado de efectividad aceptable; ya que a igualdad de tiempo de registro del frente carbonatado, un 15% de las probetas sometidas al proceso de envejecimiento, no mostraban la misma o similar profundidad de carbonatación; se considera que se debe monitorear en la cámara más eficientemente la circulación del aire húmedo y enriquecido con anhídrido carbónico, para que el medio gaseoso sea el mismo para todas las probetas.

Se comprobó cualitativamente con la medida de potencial, que el frente carbonatado había llegado al acero ocasionándole corrosión electroquímica en un tiempo muy corto, en comparación con los especímenes control cuya probabilidad de corrosión, a igualdad de

tiempo de exposición en ambiente normal, es prácticamente nulo, por lo que se concluye que el equipo de carbonatación acelerada, es válido para estudios de carbonatación del hormigón armado, para prever procesos de corrosión electroquímica en las estructuras de hormigón armado.

Como era de esperar el comportamiento del hormigón con menor relación W/C es mejor que el de mayor relación agua cemento, ya que a igualdad de tratamiento del hormigón; el de mayor relación presenta mayor porosidad por lo que la difusión de anhídrido carbónico se ve beneficiada, y el frente carbonatado tarda menos en llegar al acero del refuerzo y generar corrosión electroquímica.

REFERENCIAS

- [1] SOLORZA, B.; OCAMPO, I; VUANELLO, O; MORENO, N.; LOIÁCONO, R.; CONTI H. M "REVENICIÓN Y CORROSIÓN DEL ACERO EN ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO" IV Congreso Nacional Ambiental 2003 PRODEA - UNSJ. - San Juan – Argentina
- [2] GUNDAKER, E. F. "CORROSION MONITORING AND PROTECTION FOR INFRASTRUCTURE PROJECTS". 2nd Latin American Region Corrosion Congress, NACE, 1996
- [3] MORENO, E.I. "CARBONATION OF BLENDED CEMENT CONCRETES". PhD Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, University of South Florida, Tampa, (1999).
- [4] PAPADAKIS, V. G.; VAYENAS, C. G.; AND FARDIS, M. N. "FUNDAMENTAL MODELING AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF CONCRETE CARBONATION". ACI Mats. J. Vol. 88 No. 4, (1991) 363-373.
- [5] OCAMPO, I.; TORRES, A Y OTROS "ENVEJECIMIENTO ELECTROQUÍMICO DE PROBETAS DE HORMIGÓN ARMADO PARA SIMULAR CONDICIONES DE CORROSIÓN EN ESTRUCTURAS CIVILES". Proceedings of the *fib* International Symposium, Structural concrete and time. La Plata Argentina ISBN 987-21660-1-3 Septiembre de 2005
- [6] GONZÁLEZ, J. A., ANDRADE, C. AND ESCUDERO, M. L. "CORROSIÓN EN HORMIGÓN: CORROSIÓN DE LAS ARMADURAS POR CARBONATACIÓN DEL HORMIGÓN". Revista Iberoamericana de Corrosión y Protección, Vol. 15 No. 4, (1984)11-19.
- [7] HO, D. W. S., AND LEWIS, R. K. "CARBONATION OF CONCRETE AND ITS PREDICTION". Cement and Concrete Research, Vol. 17 No. 3, (1987) 489-504.
- [8] TREYBAL, R. "OPERACIONES DE TRANSFERENCIA DE MASA", McGraw-Hill ed., 2da Edición, México D.F., (2000).
- [9] WILLIAM M. DEEN "ANALYSIS OF TRANSPORT PHENOMENA". Oxford University Press 1998
- [10] GONZÁLEZ, J. A., AND ANDRADE, C. "RELACIONES CUANTITATIVAS ENTRE LA CARBONATACIÓN DEL HORMIGÓN Y LA CORROSIÓN DE LAS ARMADURAS". Corrosion Protection, Vol 11, (1980), 15-24.
- [11] ALONSO, C., AND ANDRADE, C. "CORROSION BEHAVIOR OF STEEL DURING ACCELERATED CARBONATION OF SOLUTIONS WHICH SIMULATE THE PORE CONCRETE SOLUTION". Mat. Constr., Vol. 37, No. 206, Madrid, (1987), 5-16.
- [12] ASTM C876 "STANDARD TEST METHOD FOR HALF CELL POTENTIALS OF REINFORCING STEEL IN CONCRETE", Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.02, 1983.