

Estudio sobre un Método de Recuperación de Hormigones Carbonatados: Proceso de Realcalinización

Autores: **A. M. Carvajal¹, A. Acuña², F. Acuña², A. Herrera², R. Vera³**

1. Máster en Materiales de Construcción. Docente Escuela de Construcción Civil, Pontificia Universidad Católica de Chile.
 2. Licenciados en Construcción Civil, Pontificia Universidad Católica de Chile.
 3. M. Sc. en Ciencia de los Materiales, Laboratorio de Corrosión, Instituto de Química, P. Universidad Católica de Valparaíso. Chile.
- emails: acarvajg,@uc.cl, agacuna@uc.cl, fmacuna@uc.cl, aherrera@uc.cl, rvera@ucv.cl.

Fecha de recepción : 28/03/05
Fecha de aceptación : 19/04/05

Study of Carbonated Concrete Recovery Method: Realkalization Process

Resumen

Esta investigación presenta el estudio, metodología y análisis experimental del proceso de realcalinización en hormigón armado.

Se utilizó cemento Portland Puzolánico y una razón agua/cemento 0,50, para fabricar probetas de hormigón de dimensiones 15 x 15 x 7,5 [cm] con 2 barras de acero A 44 – 28 H, de diámetro 10 [mm]. Las probetas fueron carbonatadas previamente en cámaras de penetración acelerada de CO₂ durante 21 días y confirmada su profundidad de carbonatación. Se utilizó una fuente de poder aplicando 25 [mA]; electrolito: carbonato de sodio 0,7 [M] y ánodos de titanio.

Se realizaron mediciones de potencial de semicelda, con el fin de determinar el estado de las barras durante el proceso de realcalinización e indicador fenolftaleína para determinar la profundidad de carbonatación en el hormigón después del proceso. Posteriormente se realizó un análisis estadístico de los valores obtenidos.

Palabras clave: Carbonatación, hormigón armado, realcalinización.

Abstract

This investigation presents a study, methodology and experimental analysis of realkalization process to reinforced concrete.

Puzzolanic Portland and a water/cement ratio: 0,50 were used in order to make 44 concrete specimens of dimensions 15 x 15 x 7.5 x [cm] with 2 steel bars A 44 – 28 H, of 10 [mm] diameter. The concrete specimens were carbonated within accelerated penetration cameras of CO₂, during 21 days. A power source of 25 [mA], sodium carbonate electrolyte (0.7 [M]) and titanium plate anodes were used in this study.

Measurements of corrosion potential were made, to determine the passivity of steel bars during and after the process and phenolphthalein to determine carbonation depth and alkalinity around the bars after realkalization. Later it was made a statistical analysis of the experimental results.

Keywords: carbonation, reinforced concrete, realkalization.

INTRODUCCIÓN

El acero embebido en el hormigón está protegido contra la corrosión gracias al elevado carácter alcalino del hormigón, sin embargo determinadas circunstancias pueden destruir esta capa protectora provocando la corrosión activa del acero. Los dos factores principales que pueden provocar esta situación son la presencia de iones agresivos (principal-

mente los cloruros) y la carbonatación del hormigón (1).

La carbonatación es un fenómeno natural que ocurre todos los días en miles de estructuras de hormigón en todo el mundo. En un hormigón que no contiene acero de refuerzo, la carbonatación es, generalmente, un proceso de pocas consecuencias. Sin embargo, en el hormigón armado, este proceso químico aparentemente inocuo, avanza lenta y progresivamente hacia adentro desde la superficie expuesta del hormigón, y despasiva al acero de refuerzo causando la corrosión. Esta corrosión en las armaduras de acero, es el más serio problema de durabilidad en estructuras de hormigón armado. Bajo condiciones normales, el hormigón provee al acero de refuerzo de una excelente protección, debido a la formación de una capa de óxido de hierro en la superficie del acero en el medio altamente alcalino, que corresponde a valores de pH entre 12 y 13 (2).

Cuando progresa la carbonatación hacia el acero de refuerzo, esa capa de óxido protectora y pasivadora deja de ser estable. A cierto nivel de pH (por debajo de 9,5) es posible que empiece la corrosión, llevando finalmente al agrietamiento del hormigón. Aunque la difusión del dióxido de carbono a través de los poros del hormigón pueda requerir años antes de que ocurra el daño por corrosión, puede ser devastadora y muy costosa de reparar (3).

La realcalinización trata de eliminar las causas de las reacciones corrosivas, que significan el reestablecimiento de la pasividad que ha sido perdida (4). Para estructuras de hormigón armado que su-

fren de carbonatación, la realcalinización electroquímica ha sido desarrollada como un tratamiento de rehabilitación (5).

DESARROLLO EXPERIMENTAL

Las probetas utilizadas para esta investigación, corresponden a cubos de hormigón con arista de 15 cm, en los cuales se embobieron 4 barras de 20 [cm] de longitud de acero estructural A 44-28 H, estriado de 10 [mm] de diámetro, y cuyo recubrimiento fue de 3 [cm].

El hormigón fue diseñado con una razón agua/cemento 0,5 utilizando cemento Portland Puzolánico.

La Figura 1 muestra el diseño de las probetas.

Confección del hormigón

Áridos

Para determinar las proporciones de los áridos que iban a ser utilizados en la mezcla, se recurrió al uso de la Curva Granulométrica de Referencia de Faury. Con lo cual se obtuvo que el 50% correspondía a gravilla y el otro 50% a arena y cemento. Finalmente, descontando el cemento, se determinó que para el árido combinado se requería de un 60% de gravilla y un 40% de arena.

El hormigón utilizado para la confección de las probetas utilizadas, se realizó en el Laboratorio de Docencia de la Escuela de Construcción Civil de la Pontificia Universidad Católica de Chile. La dosificación utilizada para 1 [m³] de hormigón con razón agua/cemento 0,50 se detalla en la Tabla 1 y las propiedades mecánicas de este en la Tabla 2.

Figura 1: Diseño de una Probeta

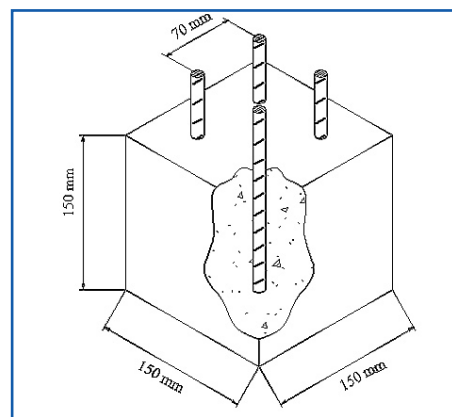


Tabla 1: Dosificación del Hormigón.

RAZÓN A/C = 0,50		
Cemento	390	kg
Agua	195	l
Aire incorporado	10	l
Arena	714	kg
Gravilla	1081	kg

Tabla 2: Propiedades Mecánicas del Hormigón Utilizado

Probeta	Largo (cm)	Ancho (cm)	Alto (cm)	Peso (kg)	Densidad (kg/m ³)	Carga de Ruptura (kN)	Resistencia (28 días)
1	15,24	15,02	15,00	8,02	2336	672	29,4 MPa
2	15,08	15,06	15,07	8,04	2350	665	29,3 MPa
3	15,18	15,05	15,11	8,08	2342	651	28,5 MPa
						Promedio	29,1 MPa

Curado de las probetas

Las probetas permanecieron en cámara de curado por un período de 28 días en condiciones de humedad relativa y temperatura de 95 ± 3 [%HR] y 20 ± 2 [°C], respectivamente.

Secado de probetas

Previo a ingresar las probetas dentro de la cámara de carbonatación, fue necesario disminuir al máximo el agua libre dentro de los poros del hormigón con el fin de que el dióxido de carbono pudiera ingresar con mayor libertad hacia el núcleo de la probeta, ya que las condiciones que favorecen la carbonatación corresponden a una humedad relativa alrededor de 55 [%HR] y temperatura de 25 [°C].

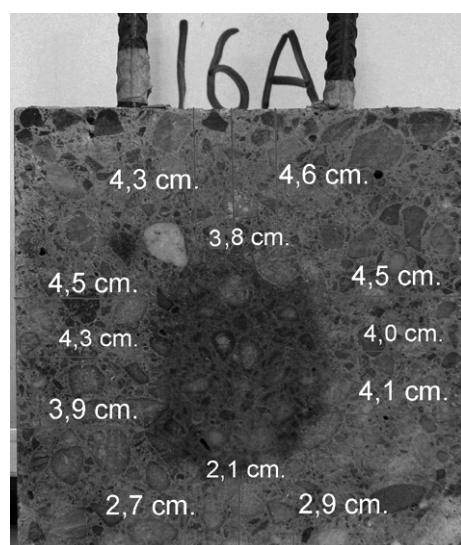


Figura 2: Probeta Carbonatada

Características del sistema de realcalinización

Cada probeta de 15 [cm] de arista fue cortada en el centro después de ser carbonatada en forma acelerada, en cámara de carbonatación anteriormente diseñada,

cuando los valores de potencial de media celda de los aceros estaban en el rango de -400 [mV] respecto del electrodo de referencia Cu/CuSO_4 , y los valores de pH en el hormigón indicaban valores menores que 10, es decir, incoloro frente al indicador fenolftaleína. En Tabla 3 se muestran las profundidades de carbonatación que alcanzan las probetas después de 21 días. La Figura 3 muestra como ejemplo una probeta tratada en la cámara acelerada de carbonatación.

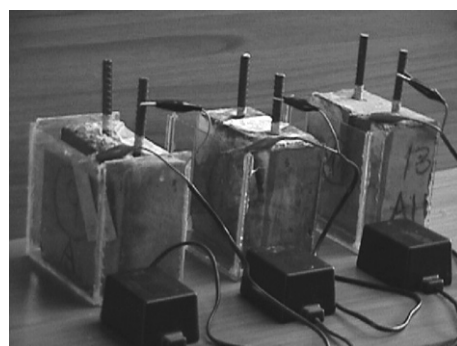


Figura 3: Probetas en Proceso de Realcalinización

Las probetas que entran al proceso de realcalinización tienen dimensiones de $15 \times 15 \times 7,5$ [cm], ya que las originales, cubos de 15 [cm] de arista, son cortadas por la mitad después del tratamiento de carbonatación acelerada, con el fin de tener registro fotográfico de la profundidad de carbonatación y también para comparar probetas realcalinizadas con las originales. Las probetas cortadas por la mitad contienen dos barras de acero, y solo una de ellas es conectada a corriente continua, dejando la otra barra como testigo que permita verificar al tiempo final, la efectividad del proceso de realcalinización del hormigón alrededor del acero.

El hormigón que rodea la barra no conectada a la corriente continua no indicaría

coloración con fenolftaleína, mientras que el hormigón que cubre la barra conectada al circuito de corriente continua, debe mostrar coloración, debido a la producción de iones hidróxidos alrededor de la barra conectada durante el proceso de realcalinización.

Se registraron valores de potencial cada hora durante las primeras 5 horas de iniciado el proceso, posteriormente medidas cada 12 horas.

Después de desconectar las probetas de la fuente de poder, se registró el potencial durante las primeras 7 horas, posteriormente, se registraban 5 datos diarios hasta completar las 60 horas aproximadamente, y por último se continuó midiendo cada 24 horas hasta llegar a las 720.

Para medir la distancia efectiva de recuperación alcalina se utilizó un vernier (tornillo micrométrico).

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Los valores iniciales de potencial de media celda caen desde el inicio del tratamiento desde -400 [mV] a valores muy bajos, cercanos a -1.000 [mV] respecto del electrodo de referencia Cu/CuSO_4 , independiente de la cantidad de horas que el sistema estuviese conectado, lo que concuerda con los valores esperados, que corresponden a valores de potencial en la zona de inmunidad del hierro, según el diagrama de Pourbaix (Figura 8).

Una vez finalizado el tratamiento, los potenciales de semicelda de las barras llegan a valores constantes entre -240

Tabla 3: Profundidad de Carbonatación de Probetas Sometidas a Carbonatación Acelerada

Probeta	Superior			Lateral Derecha			Inferior			Lateral Izquierda			Promedio
22	4,5	3,7	4,3	4,6	4,2	3,8	3,4	3,8	4,3	2,3	1,9	2,5	3,6
21	3,1	2,8	4,2	4,3	3,4	3,3	2,7	2,6	3,1	2,4	2,2	1,9	3,0
20	5,0	3,7	4,1	4,3	3,4	3,2	2,9	3,1	4,5	2,8	2,4	2,2	3,5
19	4,5	4,1	3,9	4,1	3,4	3,7	3,5	3,7	3,9	2,6	2,2	2,5	3,5
18	5,4	4,8	5,3	5,1	4,0	4,2	4,3	4,4	5,0	3,0	2,8	3,5	4,3
17	4,5	4,7	4,9	4,8	4,3	4,0	4,2	4,5	5,2	1,4	2,1	2,9	4,0
16	4,3	3,8	4,6	4,5	4,0	4,1	3,9	4,3	4,5	2,9	2,1	2,7	3,8
15	6,6	6,2	6,4	4,8	4,9	5,0	3,5	3,3	3,5	6,1	5,9	6,3	5,2
14	4,8	4,5	4,6	4,4	4,0	3,9	2,9	2,6	2,6	4,1	3,9	3,9	3,9
13	6,8	6,5	6,6	6,3	6,1	6,4	5,5	5,1	5,4	7,3	6,9	7,2	6,3
12	3,2	2,5	2,7	2,4	1,6	2,1	1,3	1,1	1,6	2,5	1,6	2,2	2,1
11	2,8	2,6	3,1	3,5	3,0	2,9	2,7	1,6	1,7	2,7	2,9	3,0	2,7
10	2,6	2,4	3,1	3,1	3,1	2,4	1,6	1,2	1,4	2,1	2,4	2,2	2,3
9	3,5	2,6	2,9	2,7	1,8	2,2	2,1	1,8	1,6	2,9	2,9	4,5	2,6
8	3,8	3,4	3,8	2,9	2,5	2,1	1,1	0,8	1,2	2,1	2,8	3,1	2,5
7	3,1	2,6	2,4	3,4	2,7	2,8	1,6	1,3	2,0	2,8	2,8	3,1	2,6
6	3,1	2,6	3,6	3,9	2,9	3,2	2,5	2,2	1,9	2,6	3,0	3,2	2,9
5	3,1	2,8	3,2	3,1	2,6	2,9	2,2	1,8	2,8	3,1	3,2	4,0	2,9
4	3,8	2,5	3,0	3,0	2,9	3,6	2,8	2,0	2,2	2,8	3,5	4,5	3,1
3	2,8	2,4	2,9	3,0	2,6	3,2	1,6	2,0	2,8	2,1	2,9	2,2	2,5
2	3,8	2,6	3,2	2,4	2,5	2,2	1,8	1,8	1,9	2,1	2,8	3,1	2,5
1	2,3	2,5	2,9	2,4	2,3	2,5	1,1	1,3	1,6	2,3	2,4	2,4	2,2

y -200 [mV], con respecto al electrodo Cu/CuSO₄, los que fueron independientes de la cantidad de horas que las probetas permanecieron en tratamiento de realcalinización (48 a 168 horas).

Sin embargo, si no se alcanza un pH básico alrededor de la barra, el potencial que adquiere el acero después del tratamiento, o en la barra sin tratamiento, está en la zona de corrosión activa, lo que también pudo ser comprobado, según se puede ver en Figura 8.

El mismo valor de potencial para barras correctamente realcalinizadas corresponde a la zona de pasivación (Figura 8).

El hecho de que los potenciales se establezcan en el rango mencionado, se debe a la película protectora pasivante de óxido alrededor de la barra de acero, que se forma al pH básico en que se encuentran los alrededores de la barra de acero después del proceso de realcalinización.

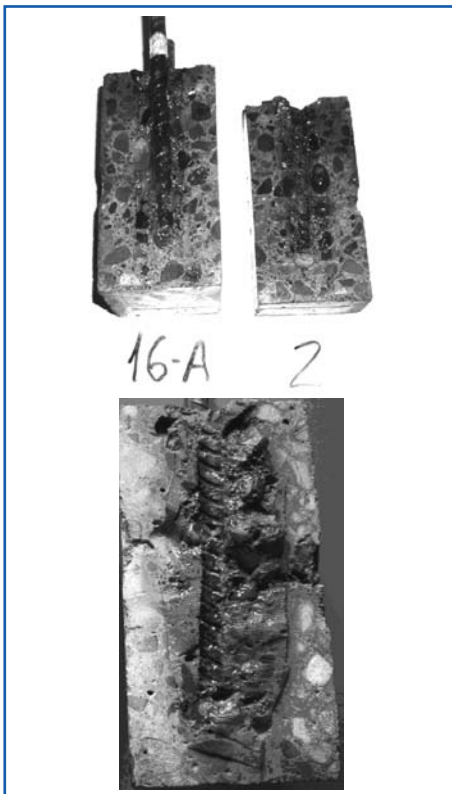
Mientras mayor es el número de días de tratamiento, mayor es el radio de recuperación de la alcalinidad del hormigón,

por lo cual puede deducirse que si se quiere mantener la pasividad del acero por tiempo prolongado, es conveniente realizar el tratamiento por 7 días, además de proteger la estructura realcalinizada con recubrimiento superficial adecuado.

Luego de modelar los datos correspondientes a las mediciones de potenciales de corrosión en distintos tiempos (2, 3, 5 y 7 días) a través de un proceso LOESS, y al observar y comparar los resultados que este entrega, se puede concluir que el ajuste es adecuado. Esto es, el modelo ajustado responde a las variaciones de

potenciales en los distintos instantes del tratamiento (con y sin corriente), y sigue la tendencia de la curva de la manera que se esperaba. Además, al evaluar la calidad del ajuste, mediante la observación de R^2 , el gráfico QQ Plot (Cuantil – Cuantil) y FAC (función de autocorrelación) para los residuos y test ANOVA se obtienen resultados que respaldan la simple apreciación, y comprueban la diferencia de potenciales antes, durante y después del tratamiento en las barras sin corriente (mV1) y en las barras con corriente (mV2) (Figuras 6, 7).

Finalmente, se puede concluir que el estudio del proceso de realcalinización de hormigones carbonatados planteado fue efectivo, encontrándose la metodología apropiada para su desarrollo.



Figuras 4 y 5: Probetas Realcalinizadas

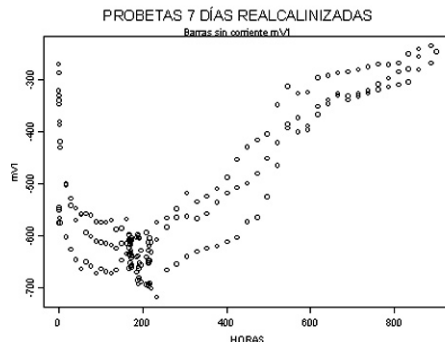


Figura 6: Potencial de Corrosión v/s Tiempo en Barras sin Corriente

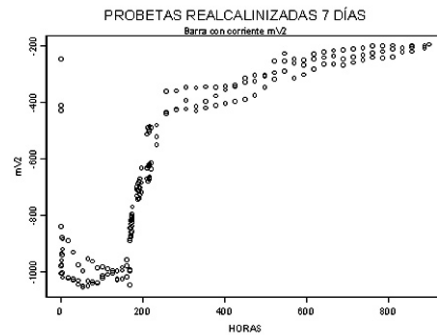
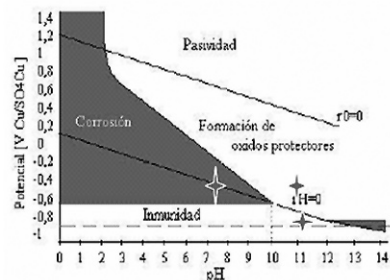


Figura 7: Potencial de Corrosión v/s Tiempo en Barras con Corriente



Termodinámica de la corrosión del hierro (Ref: Diagrama Pourbaix).

Figura 8: Diagrama de Pourbaix

AGRADECIMIENTOS

Los autores de esta investigación agradecen a la Escuela de Construcción Civil de la Pontificia Universidad Católica de Chile, por el apoyo financiero brindado.

REFERENCIAS

1. Rick Montani; La Carbonatación, Enemigo Olvidado del Concreto; Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C., Revista Construcción y Tecnología, diciembre 2000. Disponible en: <http://www.imcyc.com/revista/2000/dic2000/carbonatacion.htm/>
2. V. G. Papadakis, M. N Fardis, C. G. Vayenas; Effect of Composition, Environmental Factors and Cement-Lime Mortar Coating on Concrete Carbonation; MATERIALS AND STRUCTURES; (Vol. 25), 1992, pp: 293-304.
3. C. Andrade, M. Castellote, J. Sarría and C. Alonso: Evolution of Pore Solution Chemistry, Electro-Osmosis and Rebar Corrosion Rate Induced by Realkalization MATERIALS AND STRUCTURES / MATÉRIAUX ET CONSTRUCTIONS; (Vol. 32), July 1999, pp: 427-436.
4. L. Veerachai, K. Je-Woon, O. Masayasu, Y. Masaru., Analysis of Half-Cell Potential Measurement for Corrosion of Reinforced Concrete; CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIAL (Vol 18), April 2004, pp: 155 (8).
5. P.F.G Banfill, Heriot-Watt University, Edinburgh, Scotland, Re- Alkalization of Carbonated Concrete – Effect on Concrete Properties; CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIAL (Vol 11), 1997, N° 4, pp: 225 – 258.
6. M.R.Jones, M.D. Newlands, A.M.O. Abbas and R.K. Dhir; Comparison of 2 Years Carbonation Dephts of Common Cement Concret Using the Modified Draft CEN Test; MATERIALS AND STRUCTURES / MATÉRIAUX ET CONSTRUCTIONS; (Vol. 34), August-September 2001, pp: 396-403.
7. RILEM DRAFT RECOMMENDATION: Draft Recommendation for Repair Strategies for Concrete Structure Damaged by Reinforcement Corrosion; MATERIALS AND STRUCTURES / MATÉRIAUX ET CONSTRUCTIONS; (Vol. 27), August/September 1994, pp: 415-436. ISSN 0025-5432.

8. P.F.G Banfill, Heriot-Watt University, Edinburgh, Scotland, Re- Alkalisation of Carbonated Concrete – Effect on Concrete Properties; CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIAL (Vol 11), 1997, N° 4, pp: 225 – 258.
9. L. Veerachai, K. Je-Woon, O. Masayasu, Y. Masaru., Analysis of Half-Cell Potential Measurement for Corrosion of Reinforced Concrete; CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIAL (Vol 18), April 2004, pp. 155 (8).
10. B. Elsener, Half-Cell Potential Mapping to Assess Repair Work on RC Structure; CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIAL (Vol 15), March 2001, pp. 133.
11. C. Andrade, M. Castellote, J. Sarría and C. Alonso: Evolution of Pore Solution Chemistry, Electro-Osmosis and Rebar Corrosion Rate Induced by Realkalisation MATERIALS AND STRUCTURES / MATÉRIEAUX ET CONSTRUCTIONS; (Vol. 32), July 1999, pp:427-436.
12. Emmanuel E. Velivasakis, Fellow, ASCE, Sten K. Henriksen, and David Whitmore, Chloride Extraction and Realkalization of Reinforced Concrete Stop Steel Corrosion; JOURNAL OF PERFORMANCE OF CONSTRUCTED FACILITIES, May 1998.
13. Carvajal, A. M., Silva, Carmen, Valiente, Jorge, Venegas, Andrés; Estructuras Portuarias de Hormigón Armado en Chile. Estudio de las Variables: Tipo de Cemento y Razón Agua/Cemento que Inciden en su Durabilidad. Santiago, Chile, PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE, FACULTAD DE INGENIERÍA, ESCUELA DE CONSTRUCCIÓN CIVIL, 2003. 152 pp.
14. INSTITUTO Nacional de Normalización (Chile). Hormigón - Requisitos Generales. NCh 170 Of. 85.

Revista de la Construcción

Lo invitamos a conocer las nuevas investigaciones y aplicaciones tecnológicas de la Construcción y su campo de acción

SUSCRIPCIONES

Av. Vicuña Mackenna 4860 - Macul - Santiago
Fonos: (56-2) 354 45 51 - (56-2) 354 45 65

www.constuccioncivil.puc.cl - revistadelaconstruccion@uc.cl

