

DURACON: Effect of the Environment on Reinforced Concrete Durability. Results of Chile after 5 years of Exposure

DURACON: Influencia de la Acción del Medio Ambiente en la Durabilidad del Concreto. Parte 2. Resultados de Chile después de 5 años de Exposición



Autores

- VERA, R. - VILLARROEL, M.
DELGADO, D. Grupo de Corrosión, Instituto de Química, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
emails: rvera@ucv.cl, villarroel.maria@gmail.com, diana.delgado@ucv.cl
- CARVAJAL, A. M. Escuela de Construcción Civil, Pontificia Universidad Católica de Chile
email: acarvajg@uc.cl
- DE BARBIERI, F. Armada de Chile
email: fdebarbieri@armada.cl
- TROCONIS, O. Coordinador Internacional Proyecto DURACON, Centro de Estudios de Corrosión, Universidad del Zulia, Maracaibo, Venezuela
email: oladis@mail.luz.ve

Fecha de recepción 15/05/2009
Fecha de aceptación 02/06/2009

Resumen

En esta investigación se presentan los resultados obtenidos en Chile en el marco del proyecto internacional "Influencia de la acción del medio ambiente en la durabilidad del concreto, DURACON", que considera las investigaciones de 11 países (Argentina, Bolivia, Brasil, Chile, Colombia, Costa Rica, México, España, Uruguay, Portugal y Venezuela) que se inició en el año 2002. El proyecto considera la exposición de probetas armadas y sin armar durante al menos 5 años en estaciones localizadas en ambiente marino (Valparaíso-PUCV) y urbano (Santiago-PUC). Para ello se diseñaron hormigones de relación agua/cemento 0,45 y 0,65 y la caracterización se realizó determinando resistencia a la compresión y tracción, módulo de elasticidad, resistividad, absorción capilar, absorción total

y porosidad. La corrosión del acero se evaluó mediante potencial de corrosión y corriente de corrosión, como también se midió profundidad de carbonatación en el hormigón para determinar estado crítico del inicio de la corrosión.

En la estación marina los aceros se mantienen aún en estado pasivo, mientras que en la urbana se evidencia actividad de un acero en probeta con razón a/c 0,45, con recubrimiento de 15 mm, como también en uno de los aceros de probeta de razón a/c 0,65, lo que se asocia al ambiente industrial de alta contaminación en el sector donde se encuentra la estación, y que representa el tipo de ambiente de esta ciudad, y a los altos valores de absorción capilar que mostraron los hormigones de ambas relaciones agua/cemento, comparado con otros países.

Palabras clave: hormigón armado, corrosión atmosférica, durabilidad, cloruro, carbonatación.

Abstract

This study presents the results obtained in Chile under the international project "Influence of Environmental Action in the durability of concrete, DURACON" that joins 11 countries (Argentina, Bolivia, Brazil, Chile, Colombia, Costa Rica, Mexico, Spain, Uruguay, Portugal and Venezuela) that began in 2002. The project considers the exposure of reinforced concrete specimens for at least 5 years at stations located in the marine environment (Valparaíso-PUCV) and urban (PUC-Santiago). The concrete specimens were designed with w/c 0.45 and 0.65 and characterized by determining the compressive strength and tensile strength, elastic modulus, resistivity, capillary absorption, absorption and total porosity. The corrosion of steel was evaluated by corrosion potential and corrosion current and depth of carbonation in

the concrete to determine the critical onset corrosion.

The steels in Marine Station are still in passive state, while in urban area showed activity one steel in specimen with w/c 0.45, with 15 mm concrete coating, as well as in one of the steels with w/c 0.65. The results showed that in the marine station the reinforced steel in both concretes were in passive state, while in the urban station, one of the steels have activity for w/c ratio 0.45, covering 15 mm, and indications of activity in specimens of w/c ratio 0.65 associated to the high pollution of the industrial atmosphere where the station is located (similar to the atmosphere of the city) and to the highest values of capillary absorption that showed concretes of both w/c ratios, compared to the situation of the other countries.

Key words: reinforced concrete, atmospheric corrosion, durability, chloride, carbonation.

Introducción

El hormigón armado es un material compuesto formado por una matriz de hormigón y barras de acero, donde la durabilidad de la estructura se basa tanto en una protección física que entrega el hormigón, disminuyendo el ingreso de sustancias agresivas hacia el acero, como en una protección química otorgada por el medio básico (iones OH⁻), proveniente de la hidratación del cemento, que permite la formación de oxohidróxidos de hierro protectores sobre la superficie del acero, disminuyendo la velocidad de corrosión de la armadura. Sin embargo, a pesar de todos los estudios y adelantos por lograr la vida útil proyectada de estas estructuras, la corrosión del acero de refuerzo sigue estando presente, especialmente en ambientes agresivos como marino e industrial (1-5).

De ahí la importancia de realizar el proyecto DURACON que contempla la participación de 11 países, cuyo objetivo general es caracterizar la durabilidad de hormigón armado en diferentes condiciones ambientales en Iberoamérica. Resultados preliminares después de un año de exposición muestran claramente diferencias entre el comportamiento del hormigón armado expuesto a microclimas específicos (marino y urbano). En atmósferas marinas, el contenido de cloruro en el medio es un factor decisivo en la probabilidad de ocurrencia del fenómeno de corrosión en el acero de refuerzo (6-7).

Por otra parte, en atmósferas urbanas los factores más importantes que influyen en la corrosión del acero embebido en hormigón son: calidad del hormigón, contenido de dióxido de carbono (CO₂) y tiempo de humectación (TDH) (7-8).

En este contexto, en una publicación previa de los autores después de un año de exposición de las muestras de hormigón, se informó que el acero de refuerzo se encontraba pasivo en ambos ambientes y para los dos tipos de mezclas estudiadas (9). Por tanto, el objetivo de este trabajo es presentar los resultados obtenidos en Chile después de 5 años de exposición de las muestras de hormigón.

Procedimiento experimental

El cemento utilizado fue un cemento Portland puzolánico grado corriente, cuya composición se indica en la Tabla 1. Las mezclas de hormigón se prepararon con una relación a/c de 0,45 y 0,65 cuyo contenido se presenta en la Tabla 2. El curado de las probetas fue realizado en cámara húmeda (90-100% H.R, 17-23 °C) por un período de 28 días (9).

Para la realización de este trabajo se fabricaron probetas cilíndricas de hormigón sin armadura, de 15x30 cm para las caracterizaciones físico-mecánicas y prismáticas de 15x15x30 cm para ser expuestas en las estaciones de ensayo. Se confeccionaron también

Tabla 1 Composición del cemento

S ₁ O ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	NaO ₂	K ₂ O	SO ₃	Mn ₂ O ₃	P ₂ O ₅	TiO ₂	P.I	Cal libre	C ₃ S	C ₂ S	C ₄ AF	C ₃ A	Sup. Esp. m ² /kg	Puzolánico
21,5	4,6	3,3	62,0	2,7	0,2	0,4	2,2	0,08	0,09	0,30	2,8	0,5	66,0	16,0	11,14	6,6	360	29,7

Tabla 2 Proporciones de las mezclas utilizadas

Mezcla	Contenido (kg/m ³ hormigón) / Proporción				
	Cemento	Agua	Grava	Arena	Aditivo
a/c: 0,65	323/L	210/0,65	911/2,82	911/2,82	---
a/c: 0,45	387/L	174/0,45	929/2,40	929/2,40	4,64 Plastiment FF-86

probetas de 15x15x30 cm con 6 armaduras de acero al carbono (A 44-28 H) con espesores de recubrimiento de 1,5, 2,0 y 3,0 cm para ser expuestas al medio ambiente (9).

La caracterización mecánica de las mezclas comprendió las medidas de resistencia a compresión a 28 y 90 días (Norma ASTM C 39), resistencia a la tracción indirecta (Norma ASTM C 496) y módulo de elasticidad (Norma ASTM C 469). Por otra parte, la caracterización física del hormigón se determinó por medidas de resistividad (manual DURAR) (1), absorción total y porosidad total (Norma ASTM C 642), absorción capilar (técnica de Fagerlund) y permeabilidad a cloruros (Norma ASTM C 1202).

Figura 1 Estación atmosférica
(A) Valparaíso (B) Santiago



A



B

La estación atmosférica de Valparaíso se encuentra localizada en Lat. Sur 32°S, Long. 71° W, a una distancia lineal de 170 m de la costa y 11 m de altura sobre el nivel del mar (Figura 1A). En la misma figura se muestra la estación atmosférica de Santiago, la que se encuentra ubicada en Lat. 33.5°S, Long. 70.5°O y a una altura de 800 m sobre el nivel del mar (Figura 1B).

Los parámetros meteorológicos medidos mensualmente fueron: humedad relativa, temperatura, tiempo de humectación y cantidad de lluvia caída, y como contaminantes atmosféricos: contenido de cloruro, de sulfato y de dióxido de carbono.

El comportamiento electroquímico del acero se evaluó determinando mensualmente el potencial de corrosión (E_c), resistencia de polarización (R_p) y corriente de corrosión (I_c) utilizando un potenciótato-galvanostato GSEC 2.0, como referencia un electrodo de cobre sulfato de cobre saturado y como contraelectrodo una lámina de cobre. Se analizó la cara expuesta y no expuesta a la dirección del viento.

El frente de carbonatación de las muestras de hormigón expuestas se determinó usando la Norma UNE 112-011-94.

Resultados y discusión

Caracterización físico-mecánica del hormigón

En la Tabla 3 se presentan los datos obtenidos para la caracterización de los diferentes tipos de hormigón empleados en este estudio, donde en general los resultados se encuentran dentro de los valores aceptados por las normas chilenas con una compactación y elasticidad aceptable. En ella se confirma que un incremento en la relación agua/cemento produce un aumento en la porosidad y especialmente en la absorción capilar y por tanto una disminución en el grado de compactación de la mezcla, de esta manera el volumen de intersticios y aire presentes en el hormigón reducen la resistencia a la compresión y tracción, como también el módulo de elasticidad.

El incremento en la porosidad (mezcla a/c 0,65) produce un aumento en la absorción y permeabilidad de la mezcla, y una disminución en su resistividad

Características	Mezcla	
	a/c: 0,45	a/c: 0,65
Resistencia a la compresión, 28 días (MPa)	43,60	19,80
Resistencia a la tracción (MPa)	2,78	1,94
Módulo de elasticidad (GPa)	26,30	19,10
Resistividad (KΩcm)	8,88	6,20
Absorción total (%)	2,44	5,21
Porosidad total (%)	8,95	17,02
Absorción capilar (k/m ² s ^{1/2})	0,027	0,0341
Resistencia a penetración de agua, m(s/m ²)	2,50 x 10 ⁷	2,25 x 10 ⁷
Sorción capilar, S (m/s ^{1/2})	2,0 x 10 ⁻⁴	2,11 x 10 ⁻⁴
Porosidad efectiva, ε (%)	13,50	16,13
Permeabilidad al cloruro (coul)	---	7.339
Peso unitario (kg/m ³)	2.419	2.355

Tabla 3
Características
físico-mecánicas de las
mezclas

eléctrica, facilitando el acceso de agentes agresivos externos como los iones cloruro, permitiendo que estos deterioren en un menor tiempo la armadura de refuerzo de las probetas de hormigón. A su vez, al comparar los resultados de sorción capilar se observan valores del mismo orden de magnitud para las dos mezclas utilizadas y los datos corroboran un hormigón recomendado para ambientes menos severos.

Es importante hacer notar que los hormigones de ambas razones a/c muestran los más altos valores relativos de absorción capilar con respecto a la de los otros países participantes, hecho que se vuelve muy importante al transcurrir cinco años de investigación.

Caracterización atmosférica de las estaciones

La evaluación mensual de los parámetros climáticos y ambientales y el uso de las normas ISO 9223 a 9226 permiten clasificar la agresividad de las atmósferas de las estaciones (10-13). Los parámetros más importantes usados en esta investigación fueron temperatura, humedad relativa, tiempo de humidificación (τ), cantidad de lluvia caída, velocidad y dirección del viento, concentración de cloruro (salinidad, S),

concentración de dióxido de azufre, SO₂ (P) y concentración de dióxido de carbono (CO₂).

En las Figuras 2 y 3 se muestra la variación de los diferentes parámetros meteorológicos evaluados mensualmente para la estación de Valparaíso y Santiago, respectivamente.

En las Figuras 4 y 5 se muestra la variación de los contaminantes atmosféricos evaluados mensualmente para la estación de Valparaíso y Santiago, respectivamente.

Según la norma ISO 9223 [10] que clasifica la agresividad de las atmósferas considerando el tiempo de humectación (τ) y la deposición de los contaminantes en el ambiente (salinidad, S y compuestos sulfurados, P), a la estación de Valparaíso le correspondería una clasificación de τ_4 , S₁, P₁, propio de un ambiente marino. En cambio, la estación de Santiago se clasifica como una estación urbana ya que le corresponde τ_3 , S₀ y P₀ con un alto contenido de CO₂. Por tanto, los parámetros principales que afectan el proceso de corrosión del acero de refuerzo deberán ser el contenido de cloruro y de dióxido de carbono. Sin embargo, en un hormigón carbonatado también es importante considerar los valores de humedad relativa (HR), tiempo de humidificación (τ) y cantidad de lluvia caída.

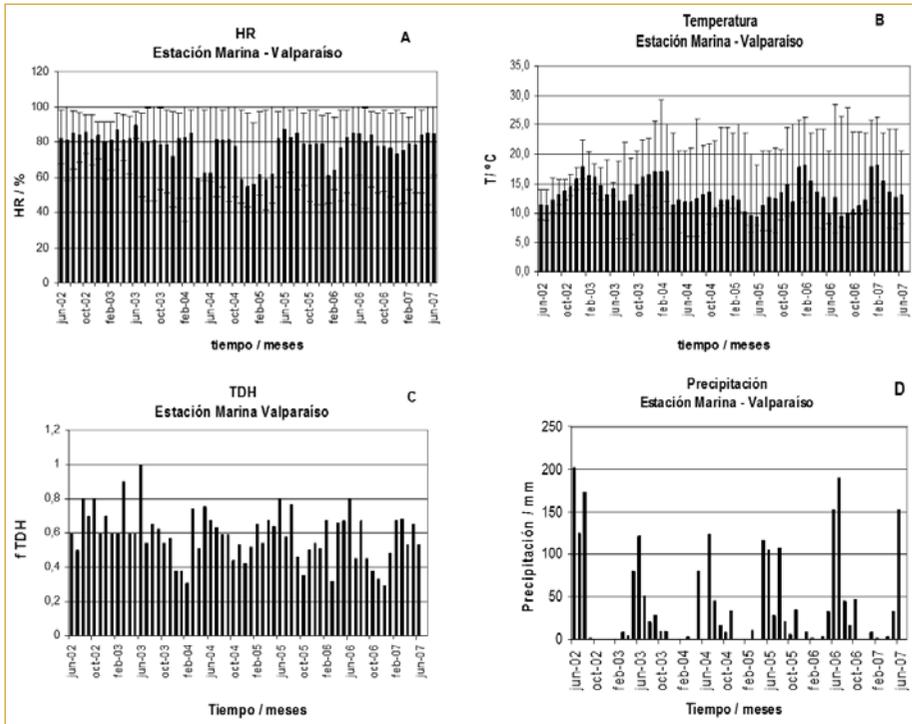


Figura 2
 Estación atmosférica de Valparaíso
 (A) Humedad relativa
 (B) Temperatura
 (C) Tiempo de humidificación
 (D) Lluvia caída

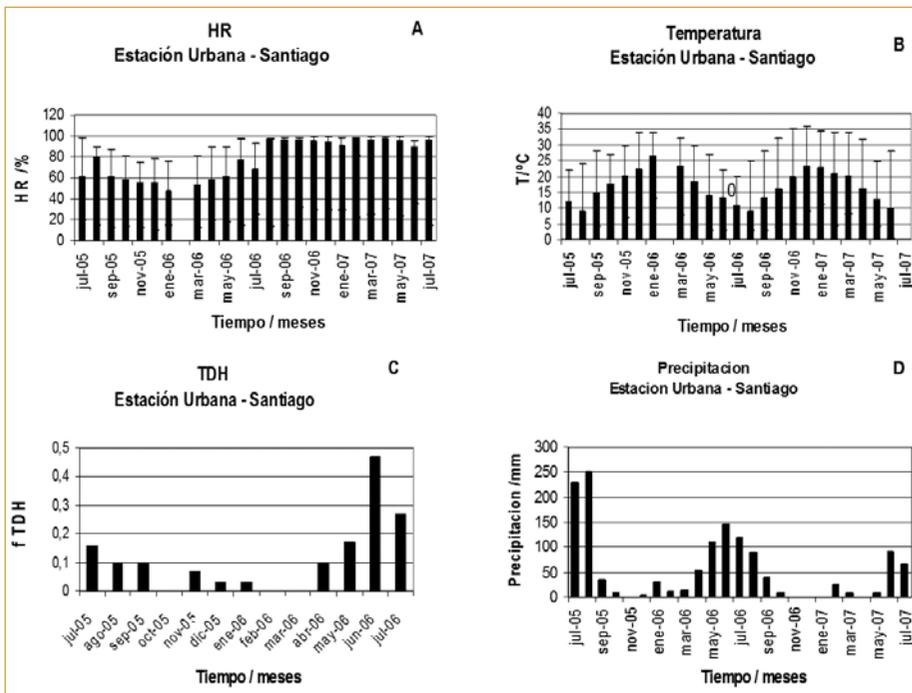


Figura 3
 Estación atmosférica de Santiago
 (A) Humedad relativa
 (B) Temperatura
 (C) Tiempo de humidificación
 (D) Lluvia caída

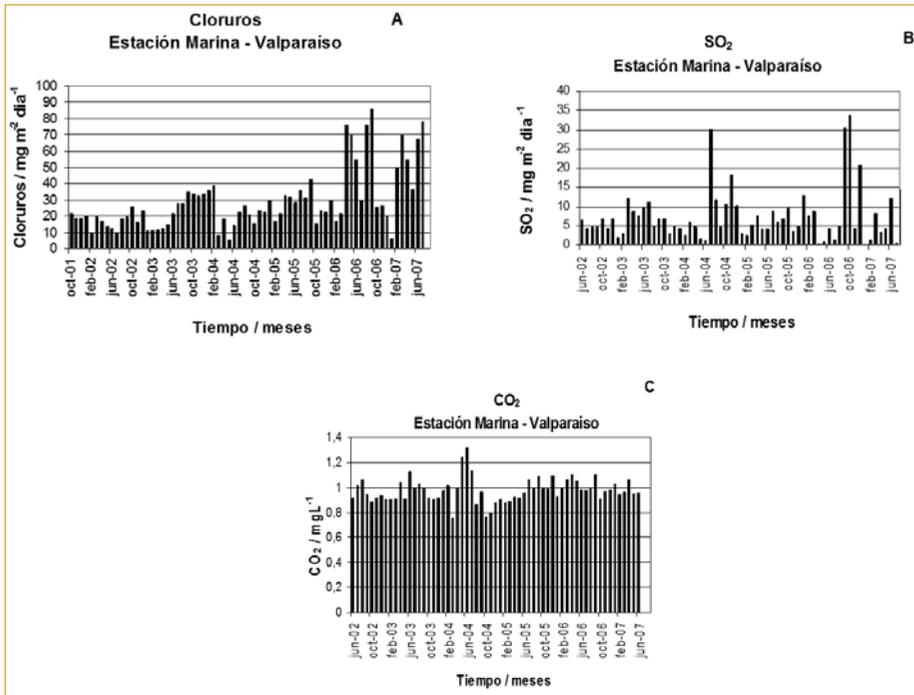


Figura 4
Estación atmosférica de Valparaíso. (A) Cloruro (B) SO₂ (C) CO₂

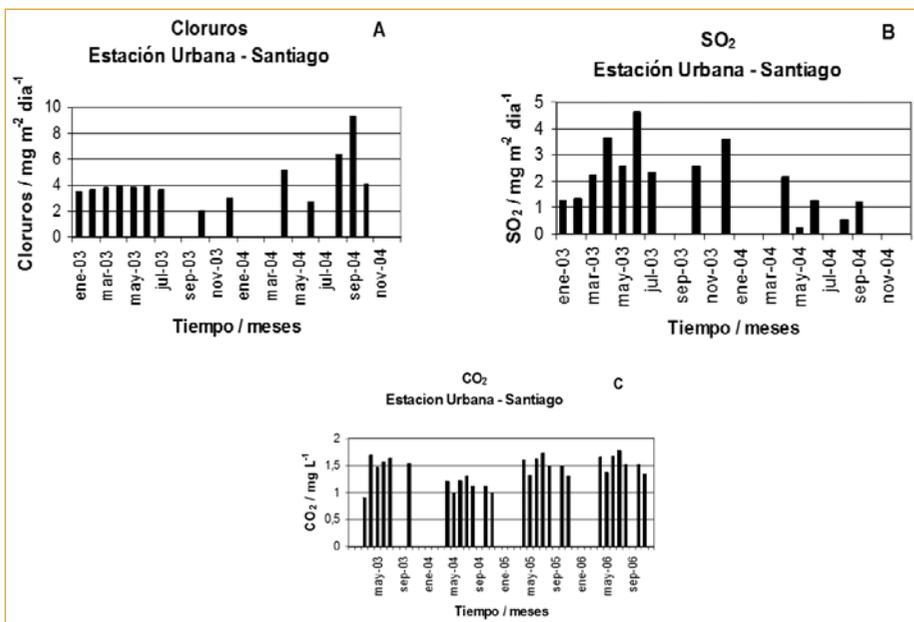


Figura 5
Estación atmosférica de Santiago. (A) Cloruro (B) SO₂ (C) CO₂

Evaluación del potencial y corriente de corrosión

En la Figura 6 se aprecia la variación del potencial de corrosión (E_c) y la velocidad de corrosión (I_c) en función del tiempo, medido para acero de refuerzo con dos diferentes recubrimientos (15 y 20 mm) ubicados en la cara expuesta al medio marino en un hormigón de relación a/c 0,45. En ella se observa que los valores de E_c son ligeramente superiores para un espesor de recubrimiento mayor y que las corrientes de corrosión hasta el momento de informar son similares. Estos resultados muestran que en estas condiciones las armaduras aún se encuentran pasivas dado que el potencial de corrosión se encuentra a valores más positivos que $-250,0$ mV y la corriente de corrosión es ligeramente inferior a $0,10 \mu\text{Acm}^{-2}$. Estos valores son limitantes para diferenciar entre el estado pasivo y activo del acero de refuerzo.

Por otra parte, en la Figura 7 se muestran los resultados para un hormigón de relación a/c 0,65. A diferencia de los resultados obtenidos para la mezcla de a/c 0,45, en este caso el acero con un recubrimiento de 15 mm presenta valores de E_c e I_c cercanos a las condiciones de actividad. En cambio, un acero de recubrimiento 20 mm aun se mantiene en condiciones pasivas.

En la Figura 8 se presentan los resultados de E_c para acero con recubrimientos de 15 y 20 mm en los dos tipos de mezclas en la estación urbana de Santiago.

Los resultados evidencian actividad del acero a 15 mm de recubrimiento en una probeta de hormigón de relación a/c 0,45 y para 20 mm en la misma muestra. El E_c ha comenzado a disminuir a valores cercanos a -400 mV y -200 mV, respectivamente. Este hecho está asociado a una situación puntual, debido a que la muestra por algún tiempo se encontró sobre el césped de la estación, por tanto, expuesta a condiciones diferentes a las que considera la investigación. El medio es más ácido debido a los abonos agregados al terreno, sumado a la existencia de materia orgánica en descomposición, que pudieron disminuir el potencial de corrosión, y efectivamente provocar actividad de los aceros más cercanos. Se debe sumar a esto los altos valores de absorción capilar de este hormigón, que hacen más efectiva la penetración de agentes externos, que en este caso corresponde a solución acuosa de carácter ácido proveniente del césped abonado con materia orgánica en descomposición, cuyo pH es cercano a 5.

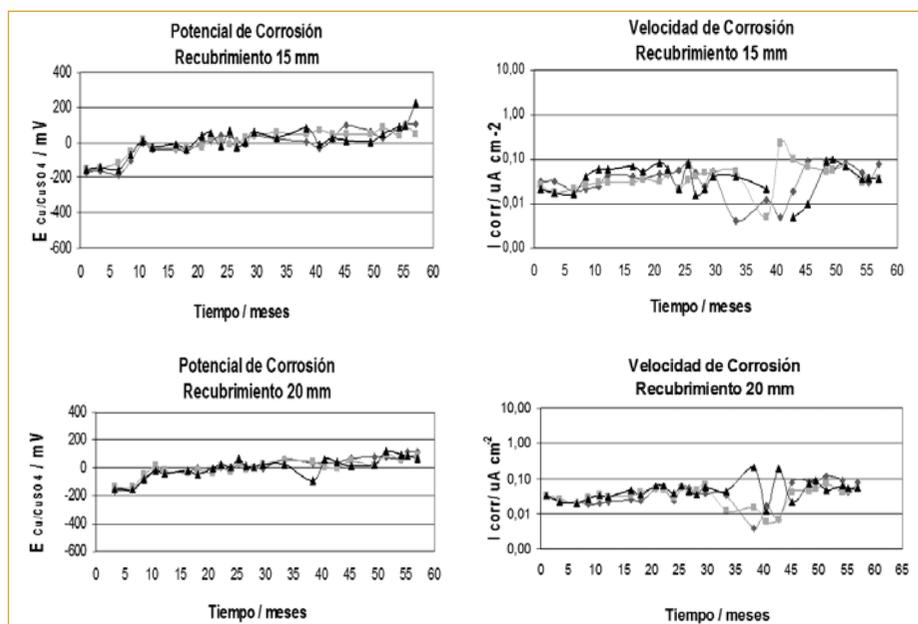


Figura 6

Potencial y corriente de corrosión en función del tiempo para el acero de refuerzo en hormigón de a/c 0,45, cara expuesta en la estación marina de Valparaíso

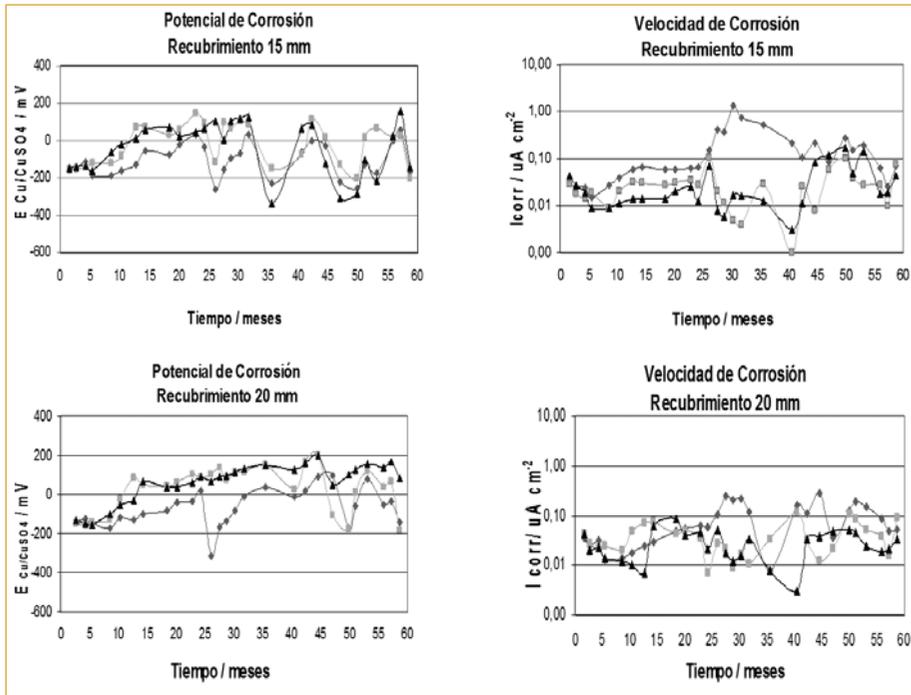


Figura 7
 Potencial y corriente de corrosión en función del tiempo para el acero de refuerzo en hormigón de a/c 0,65, cara expuesta en la estación marina de Valparaíso

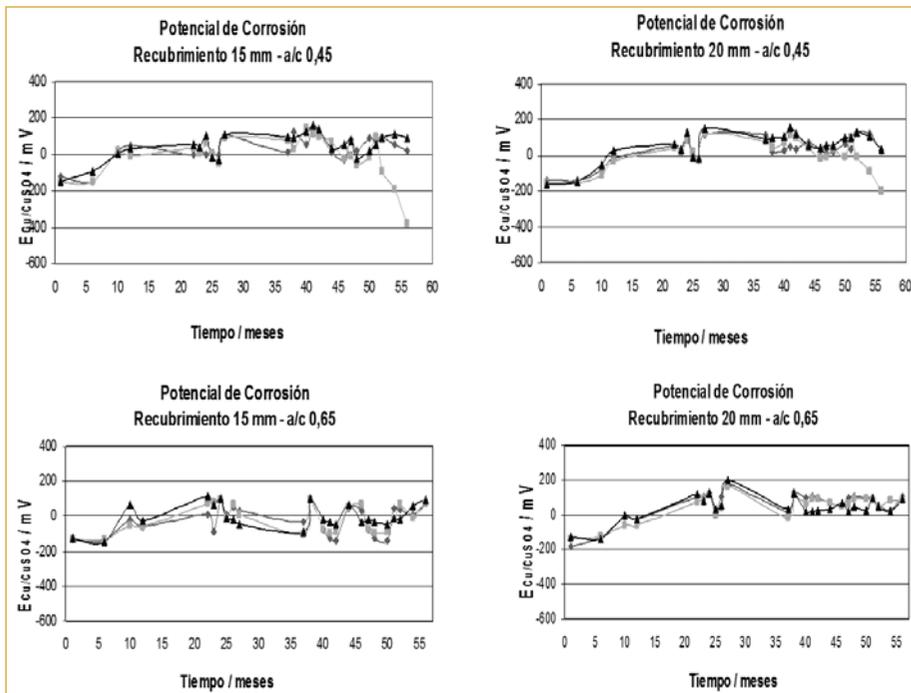


Figura 8
 Potencial de corrosión en función del tiempo para el acero de refuerzo en hormigón de a/c 0,45 y 0,65, cara expuesta en la estación urbana de Santiago

Además, es importante considerar que el contenido de CO₂ ambiental superior a 1,0 mg/L en la estación urbana corresponde a una alta contaminación, y es propio del tipo de ambiente de la ciudad de Santiago. Por otra parte, los cambios de humedad relativa a lo largo del día tienen variaciones importantes, ya que durante la mañana se registran valores de 85-95% humedad, la que varía hasta llegar al orden de 40% para luego ascender en la noche nuevamente.

En la figura 8 se observa que el refuerzo ubicado a 15 mm de recubrimiento en una mezcla de relación a/c 0,65 se comporta de forma inestable, presentando valores de Ec que fluctúan entre -200 mV y 100,0 mV, a diferencia del acero a 20 mm que alcanza potenciales superiores a 0 mV, manteniéndose aun en estado pasivo.

Determinación de la profundidad de carbonatación

En la Tabla 4 se presentan los resultados de las medidas de profundidad de carbonatación para las muestras en las dos estaciones. Existen diferencias importantes entre la zona urbana y marina durante los primeros años. Esto se puede explicar debido a que el ambiente industrial fue de alta contaminación hasta el año 2004 en la zona de Santiago en que se encuentra la estación (comuna Macul) por lo que se obtuvo una profundidad de carbonatación más alta que en otros países, a diferencia de la zona de Valparaíso, zona costera que históricamente no ha presentado contaminación del tipo industrial. Sin embargo, el escenario en ambas zonas ha ido cambiando en sus niveles de contaminación, disminuyendo la velocidad de penetración de CO₂ en Santiago, y, por otro lado, aumentando en Valparaíso.

Conclusiones

- La probabilidad de que la barra de refuerzo presente corrosión en un determinado ambiente dependerá de las condiciones climáticas y contaminantes del lugar en el que se encuentre expuesto, de la calidad y recubrimiento del hormigón.
- Los resultados después de 5 años de exposición al medio atmosférico muestran que el hormigón preparado con una relación de agua/cemento 0,45 proporciona una mayor protección a la armadura de acero frente a la corrosión en medio marino y urbano, debido a que el hormigón presenta menor absorción y porosidad total, como también una mayor resistencia a la tracción y compresión.
- En la estación marina de Valparaíso el acero de refuerzo con un recubrimiento de 15 mm en la mezcla de a/c 0,45 y 0,65 ha comenzado a presentar actividad alcanzando valores de potencial de corrosión cercanos a -200 mV y corrientes de corrosión alrededor de 0,07 µAcm⁻².
- En la estación urbana se puede detectar un riesgo de corrosión alto en la probeta que estuvo en contacto con un suelo de pH bajo, lo que puede representar un foco de estudio interesante para analizar en esta probeta, que difiere de las similares ubicadas en esta estación.
- La profundidad de carbonatación en la estación urbana muestra valores también altos con respecto a la estación marina, pero estos valores aún no se reflejan en los valores de potencial de corrosión, que debieran mostrar mayor actividad.

Año	Profundidad de carbonatación a/c 0,45 (mm)		Profundidad de carbonatación a/c 0,65 (mm)	
	Santiago	Valparaíso	Santiago	Valparaíso
1	6	3,2	11	7,8
2	12,5	4	13	9,7
3	--	--	--	--
4	19,5	--	18	--
5	20	--	22	--

Tabla 4
Profundidad de carbonatación de las muestras en ambiente marino e industrial

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Dirección de Investigación de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, a la

Escuela de Construcción Civil, Pontificia Universidad Católica de Chile, a la Armada de Chile y al Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el desarrollo (CYTED), Proyecto XV.3 DURACON.

Referencias

1. Troconis de Rincón, O. and DURAR Network Members. Manual for Inspecting, Evaluating and Diagnosing Corrosion in Reinforced Concrete Structures. CYTED. ISBN 980-296-541-3, Maracaibo, Venezuela (2000).
2. Alonso, C., Andrade, C., Castellote, M. y Castro, P.: "Chloride threshold values to depassivate reinforcing bars embedded in a standardized OPC mortar", Cement and Concrete Research, 30(7), 1047-1055, (2000).
3. Moreno, M., Morris, W., Alvarez, M. G. y Duffo, G. S.: "Corrosion of reinforcing steel in simulated concrete pore solutions. Effect of carbonation and chloride content", Corros. Sci., 46, 2681-2699, (2004).
4. Alonso, C., Castellote, M. and Andrade, C.: "Chloride threshold dependence of pitting potential of reinforcements", Electrochimica Acta, 47, 3469-3481, (2002).
5. Troconis de Rincón, O., Castro, P., Moreno, E. I., Torres-Acosta, A. A., Morón de Bravo, O., Arrieta, I., García, C., García, D. and Martínez, M.: Chloride profiles in two marine structures-meaning and some prediction", Building and Environment, 39(9), 1065-1070, (2004).
6. Troconis de Rincón, O. and Duracon Collaboration: "Durability of concrete structures: DURACON, an iberoamerican project. Preliminary results", Building and Environment, 41, 952-962, (2006).
7. Troconis de Rincón, O. and Duracon Collaborations: "Effect of the marine environment on reinforced concrete durability in iberoamerican countries: duracon project/cyted", Corros. Sci., 49(7), 2832-2843, (2007).
8. Troconis de Rincón, O. and Duracon Collaborations: "The use of polarization resistance to evaluate the environmental impact on reinforced concrete structures in the iberoamerican region", ECS Transactions, 3(13), 111-116, (2007).
9. Vera, R., Delgado, D., Villarroel, M., Palma, G., Carvajal, A. M., "DURACON: Influencia de la acción del medio ambiente en la durabilidad del concreto. Resultados preliminares de Chile", Revista de la Construcción, 7(2), 56-61, (2008).
10. ISO 9223, Corrosion of metals and alloys, Classification of corrosivity of atmospheres, ISO, Geneva, 1991.
11. ISO 9224, Corrosion of metals and alloys, Guiding values for the corrosivity categories of atmospheres, ISO, Geneva, 1991.
12. ISO 9225, Corrosion of metals and alloys, Corrosivity of atmospheres- methods of measurement of pollution, ISO, Geneva 1991.
13. ISO 9226, Corrosion of metals and alloys, Corrosivity of atmospheres-methods of determination of corrosion rate of standard specimens for the evaluation of corrosivity, ISO, Geneva 1991.