

ppi 201502ZU4659

Esta publicación científica en formato digital es
continuidad de la revista impresa

ISSN 0254 -0770 / e-ISSN 2477-9377 / Depósito legal pp 197802ZU38



LUFKIN

REVISTA TÉCNICA

DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA

Una Revista Internacional Arbitrada
que está indizada en las publicaciones
de referencia y comentarios:

- REDALYC
- REDIB
- SCIELO
- DRJI
- INDEX COPERNICUS INTERNATIONAL
- LATINDEX
- DOAJ
- REVENCYT
- CHEMICAL ABSTRACT
- MIAR
- AEROSPACE DATABASE
- CIVIL ENGINEERING ABTRACTS
- METADEX
- COMMUNICATION ABSTRACTS
- ZENTRALBLATT MATH, ZBMATH
- ACTUALIDAD IBEROAMERICANA
- BIBLAT
- PERIODICA

UNIVERSIDAD DEL ZULIA

Aniversario de la Facultad de Ingeniería de LUZ
(1948-2026).
Desde 1948, siendo referencia nacional en la formación
técnica y humana. Son 80 años de trayectoria dedicados
a la formación de ingenieros íntegros para la nación.







VOLUMEN 49

EDICIÓN CONTINUA

AÑO 2026

Uso de Velocidad de Corrosión Acumulada Para Estimar la Vida Útil del Concreto Armado Expuesto a Largo Plazo en Medio Marino y Urbano

*Luis Enrique Navarro Villalobos , José Daniel Chirinos Uzcategui, Gabriel José Bustos Viloría, Carlos Alfredo Sánchez Viloría, Nicole Alejandra Pirela Pizzella , Estefani Malolis Carvajal Vergara, Miguel Antonio Sánchez Gómez, Oladis T. de Rincón , Valentina Millano González .

Centro de Estudios de Corrosión, Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia. Maracaibo 4001, Zulia, Venezuela.

*Autor de correspondencia: luisnavarro23736@gmail.com

<https://doi.org/10.22209/rt.v49a04>

Recepción: 28 enero de 2025. / Aceptación: 30 marzo de 2026. / Publicación: mayo 2026.

Resumen

En este trabajo se evaluó el desempeño del concreto armado expuesto a un ambiente urbano en la ciudad de Maracaibo, y a un ambiente marino acelerado mediante el rocío de solución salina al 3,5% p/p según norma ISO 11474, en probetas prismáticas elaboradas de concreto armado pertenecientes al proyecto DURACON. Las probetas expuestas en ambiente urbano fueron las elaboradas con relación agua cemento (a/c) de 0,45 y de 0,65, mientras que las probetas expuestas al ambiente marino acelerado con relación (a/c) 0,45. Se realizaron mediciones periódicas utilizando técnicas electroquímicas para la velocidad de corrosión, potencial de corrosión y resistividad, que permitieron la estimación de la vida útil por medio de la velocidad de corrosión acumulada. Los resultados demuestran actividad electroquímica por corrosión de las probetas expuestas a medio urbano con relación a/c de 0,65 a partir del periodo de exposición de 240 meses, alcanzando potenciales de corrosión promedios de hasta -410 mV vs Cu/CuSO₄ y velocidades de corrosión cercanas y superiores a 0,1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$. Las probetas expuestas a un medio marino acelerado, también muestran actividad por corrosión con incrementos significativos en velocidad de corrosión alcanzando velocidad de hasta 1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ y potenciales de corrosión de -450mV vs Cu/CuSO₄.

Palabras clave: ambiente marino; ambiente urbano; concreto armado; corrosión acumulada; vida útil.

Use of Cumulative Corrosion Rate to Estimate the Useful Life of Long-Term Exposed Reinforced Concrete in Marine and Urban Environments

Abstract

This study evaluated the performance of reinforced concrete exposed to an urban environment in the city of Maracaibo, and to an accelerated marine environment using a 3.5% w/w saline solution spray, according to ISO 11474, on prismatic reinforced concrete specimens from the DURACON project. The specimens exposed to the urban environment were those made with water-cement ratios (w/c) of 0.45 and 0.65, while the specimens exposed to the accelerated marine environment had a w/c ratio of 0.45. Periodic measurements were taken using electrochemical techniques to determine corrosion rate, corrosion potential, and resistivity, allowing for the estimation of service life based on the cumulative corrosion rate. The results demonstrate electrochemical corrosion activity of the specimens exposed to an urban environment with a water-to-cement ratio of 0.65 from the exposure period of 240 months, reaching average corrosion potentials of up to -410 mV vs. Cu/CuSO₄ and corrosion rates close to and exceeding 0.1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$. Meanwhile, the specimens exposed to an accelerated marine environment also exhibit electrochemical corrosion activity with significant increases in corrosion rate, reaching up to 1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ and corrosion potentials of -450 mV vs. Cu/CuSO₄.

Keywords: corrosion; marine environment; reinforced concrete; service life; urban environment.

Uso da taxa cumulativa de corrosão para estimar a vida útil do concreto armado exposto a longo prazo em ambientes marinhos e urbanos

Resumo

Neste trabalho, avaliou-se o desempenho do betão armado exposto a um ambiente urbano na cidade de Maracaibo e a um ambiente marinho acelerado por pulverização com uma solução salina a 3,5% em massa, de acordo com a norma ISO 11474, em corpos de prova prismáticos de betão armado pertencentes ao projeto DURACON. Os corpos de prova expostos ao meio urbano foram os fabricados com uma relação água/cimento (a/c) de 0,45 e outros de 0,65, enquanto os corpos de prova expostos ao meio marinho acelerado foram os fabricados com uma relação a/c de 0,45. Foram realizadas medições periódicas para determinar a taxa de corrosão, o potencial de corrosão e a resistividade. Estas medições permitiram estimar a vida útil com base na taxa de corrosão cumulativa. Os resultados demonstram atividade de corrosão eletroquímica nas amostras expostas a um meio urbano com uma relação água/cimento de 0,65, a partir do período de exposição de 240 meses, atingindo potenciais de corrosão médios até -410 mV vs. Cu/CuSO₄ e taxas de corrosão próximas e superiores a 0,1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$. A um ambiente marinho acelerado também exibem atividade de corrosão com na taxa de corrosão, atingindo até 1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ e potenciais de corrosão de - 450 mV vs. Cu/CuSO₄.

Palavras-chave: ambiente marinho; ambiente urbano; concreto armado; corrosão; vida útil.

Introducción

El deterioro prematuro de las estructuras de concreto armado es causado por la corrosión del acero de refuerzo. Este provoca daños considerables y perjudiciales a las estructuras que se encuentran en las zonas costeras, urbanas e industriales (Castro *et al.*, 2008). Este proceso se ha incrementado a lo largo de los años debido a las virtudes excepcionales del concreto armado se convirtió en el material habitual para la construcción cuya propiedad principal es la resistencia a los esfuerzos de compresión lo cual lo hace muy útiles para las edificaciones como puentes, muelles y distintas obras industriales. Sin embargo, los innumerables accidentes han priorizado el estudio de estos sistemas compuestos en función a las particularidades de cada región (Troconis de Rincón *et al.*, 2006; Troconis de Rincón *et al.*, 2007; Troconis de Rincón *et al.*, 2015; Troconis de Rincón *et al.*, 2016).

Una reserva alcalina de concreto que ayuda a mantener la capa pasiva del acero de refuerzo protegiéndola inicialmente. Sin embargo, este tipo de corrosión en general se debe al ataque destructivo de iones cloruro, sulfatos y dióxido de carbono que están presentes en entornos urbanos y/o industriales, estos penetran desde el exterior por mecanismo de transporte conocidos como la difusión. Una vez estos agentes superan la barrera física del hormigón, se produce la despasivación y se forman productos de corrosión en el perímetro de la barra de refuerzo. El desempeño del concreto armado está en función de las propiedades fisicoquímicas de los diseños de mezcla y de las condiciones ambientales particulares de exposición. (Majlesi *et al.*, 2023; Millano-González *et al.*, 2023)

Este proyecto de investigación forma parte del proyecto DURACON iniciado en 2000 (Troconis de Rincón *et al.*, 2006), el cual ha generado resultados experimentales que sirven de referencia para el control de la corrosión en concreto armado en medios urbanos y medios marinos, ya que ha considerado medios de exposición característicos de diversos países iberoamericanos representando estructura de concreto armado a nivel mundial. El presente trabajo permite ahondar y resaltar parámetros como la estimación de la vida útil (Tuutti 1982) para la toma de decisiones de intervención y mantenimiento de las estructuras tomando en cuenta criterios de construcción y variables fisicoquímicas del concreto para proveer un método de estimación veraz de los periodos de iniciación y propagación de la corrosión para el control de la corrosión.

Materiales y Métodos

Población y muestra

Para el medio urbano se expusieron (06) probetas con dos relaciones de agua/cemento (a/c); 0,45 y 0,65; con espesores de recubrimientos de concreto o profundidad del refuerzo de: 15, 20 y 30 mm; embebidos en dos caras de exposición, cara expuesta (CE) y cara resguardada (CR). Las probetas P2, P3, P4 fueron de relación a/c de 0,65 y P1, P5 y P6 de relación a/c de 0,45. En el medio marino las probetas M5, M3 y M2 fueron de relación a/c de 0,45. Estas probetas de medio marino fueran expuestas a un rociado salino siguiendo el procedimiento descrito en la norma ISO-11474.

Tiempos y medios de exposición

Las probetas de concreto armado expuestas a medio urbano inicialmente se encontraban en la estación experimental en el estado Zulia, específicamente en la estación Base Aérea Rafael Urdaneta (BARU) desde julio 2002 hasta marzo 2014, alcanzando 140 meses de mediciones continuas, correspondiendo al primer periodo de evaluación. Dichas probetas sufrieron una interrupción en su evaluación desde marzo 2014 hasta septiembre 2021 (90 meses) manteniéndose expuestas en la misma estación experimental. Para el estudio de las probetas en medio urbano en este trabajo, fueron reubicadas en las inmediaciones de la Universidad del Zulia para facilitar su monitoreo, retomándose las mediciones a partir de septiembre 2021 hasta agosto 2024.

Por otro lado, las probetas de concreto armado expuesto a medio marino inicialmente se encontraban en la estación experimental en el estado Falcón, específicamente en la estación “La Voz de Venezuela”, en el pueblo “Puerto Escondido, desde julio 2002 hasta agosto 2018, con una evaluación periódica hasta junio 2013 correspondiente a 131 meses de medición continua, identificándose como el primer periodo de evaluación. Dichas probetas sufrieron una interrupción en su exposición al medio ambiente natural, desde agosto 2018 hasta diciembre 2019 (15 meses), resguardadas durante este tiempo en el laboratorio de Concreto del Centro de Estudio de Corrosión de LUZ, luego de esa interrupción fueron reubicadas en las inmediaciones de la Universidad del Zulia para facilitar su monitoreo. El segundo periodo de evaluación inició a partir de diciembre de 2019 hasta julio 2023, utilizando la norma ISO-11474 para simular las condiciones ambientales marinas a través del rocío con solución salina al 3,5% p/p tres (03) veces por semana durante el periodo de evaluación.

Técnicas electroquímicas

Para la evaluación del comportamiento electroquímico se utilizó un multímetro para el registro del potencial de corrosión (E_{corr}) y el equipo Gecor 10 para la velocidad de corrosión natural (I_{corr}). El criterio de potencial utilizado según los medios de exposición fue de -250mV vs Cu/CuSO_4 y -150mV vs Cu/CuSO_4 (ASTM C-876-87, 1987), para medio marino y medio urbano, respectivamente. En cuanto a la velocidad de corrosión, el criterio correspondió a $0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ (Rincón *et al.*, 1997), para ambos medios de exposición. El cálculo de la velocidad de corrosión acumulada se realizó integrando la curva de corrosión natural, registrada para cada tiempo de evaluación.

Medición de grietas

La determinación de grietas se realizó utilizando sobre la superficie de ambas caras de cada probeta, un medidor de grietas de escala milimétrica.

Resultados y Discusión

Avance de grietas para probetas expuestas a medio urbano y marino

Los registros de ancho de grietas obtenidos en las probetas expuestas a medios urbano correspondieron en las probetas de a/c 0,65 en ambas caras de exposición para los diferentes espesores, para las barras a 15mm, 20 mm y 30 mm, con valores máximos de 0,3 mm en la cara expuesta para la barra a 15 mm de espesor (probeta 4). En las probetas de a/c 0,45 en ambas caras de exposición no cambios ni evidencia de grietas considerando que son probetas de mayor durabilidad

para el ambiente de exposición evaluado. Por su parte las probetas expuestas a medio marino acelerado alcanzaron anchos de grietas mayores a 0,5 mm, consideradas de elevadas para la veracidad de las lecturas electroquímicas (Millano 2015; Troconis de Rincón *et al.*, 2018).

Durabilidad a largo plazo

Se presentan resultados de la velocidad de corrosión natural y velocidad de corrosión acumulada para las probetas de relación agua cemento a/c 0,65 (Figura 1a y 1b). En su cara expuesta, se puede apreciar valores de velocidad de corrosión natural que alcanzan el criterio de actividad por corrosión según manual de DURAR de $0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ para algunos periodos de evaluación, umbral que al mantenerse por un periodo de tiempo puede generar la producción de óxidos expansivos que provocan la fisuración del recubrimiento acortando la vida útil del concreto. De aquí que el análisis de los cambios de pendiente descritos en la Figura 1 nos describen las etapas de la vida útil y residual de las probetas, como el periodo de ingreso de los contaminantes (primera pendiente) hasta alcanzar la concentración y/o espesor de la armadura para dar inicio y propagación de la velocidad de corrosión activa correspondiente a la 2da pendiente, y finalmente la aparición de las grietas que corresponde al inicio de la vida residual con la 3era pendiente, momento en el cual el concreto ha alcanzado su tiempo máximo de vida útil. En la Figura 1b se observan las tres pendientes, el periodo de ingreso de los contaminantes e inicio del periodo de corrosión activa con el primer cambio de pendiente a los 98 meses y el inicio de la vida residual con el segundo cambio correspondiente a la tercera pendiente a los 250 meses aproximadamente. A diferencia de las probetas de a/c 0,45 Figura 2 no muestran cambios significativos en las pendientes debido a que son de alta durabilidad, y durante la investigación todavía se encuentran en periodo de ingreso de los contaminantes al nivel de armadura para luego dar inicio al proceso de corrosión activa.

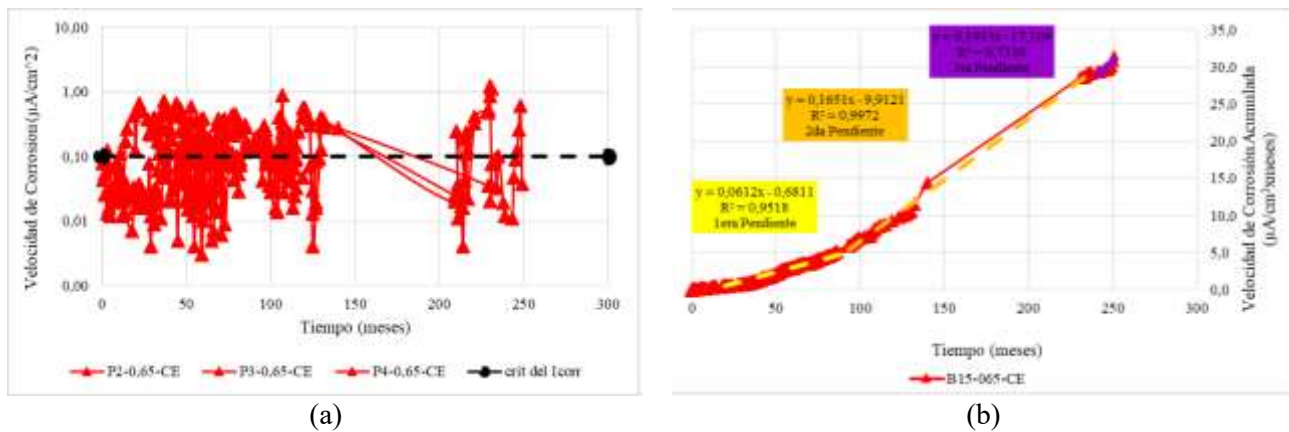


Figura 1. Velocidad de corrosión natural (a) y velocidad de corrosión acumulada (b) del acero a 15 mm de profundidad de probetas en medio urbano de relación a/c de 0,65 y cálculo de pendientes de velocidad acumulada, en su cara expuesta.

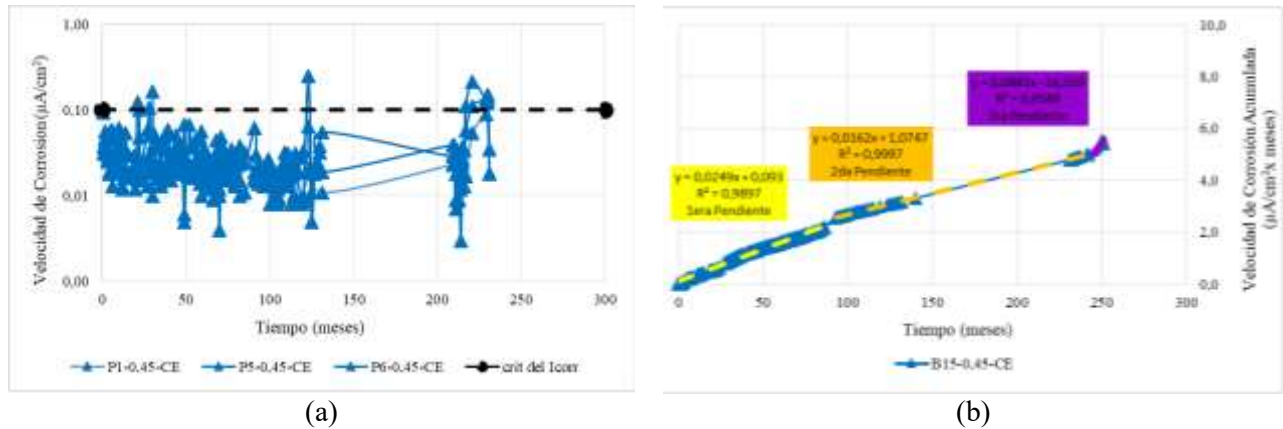


Figura 2. Velocidad de corrosión natural (a) y velocidad de corrosión acumulada (b) del acero a 15 mm de profundidad de probetas en medio urbano de relación a/c de 0,45 y cálculo de pendientes de velocidad acumulada, en su cara expuesta.

En las probetas de relación a/c de 0,45 expuestas al medio marino acelerado, en la Figura 3 se presentan los valores de la velocidad de corrosión natural y acumulada, en su cara expuesta se puede apreciar valores mayores al criterio establecido de riesgo por corrosión, esto se debe a que el ataque por iones cloruros es más acelerado con respecto a la carbonatación (CO₂) incluso alcanzando valores mayores a 10 µA/cm². Los cambios de pendiente se muestran en 50 meses para el fin del periodo de ingreso de los contaminantes e inicio de la corrosión y su vida residual inicia a los 249 meses.

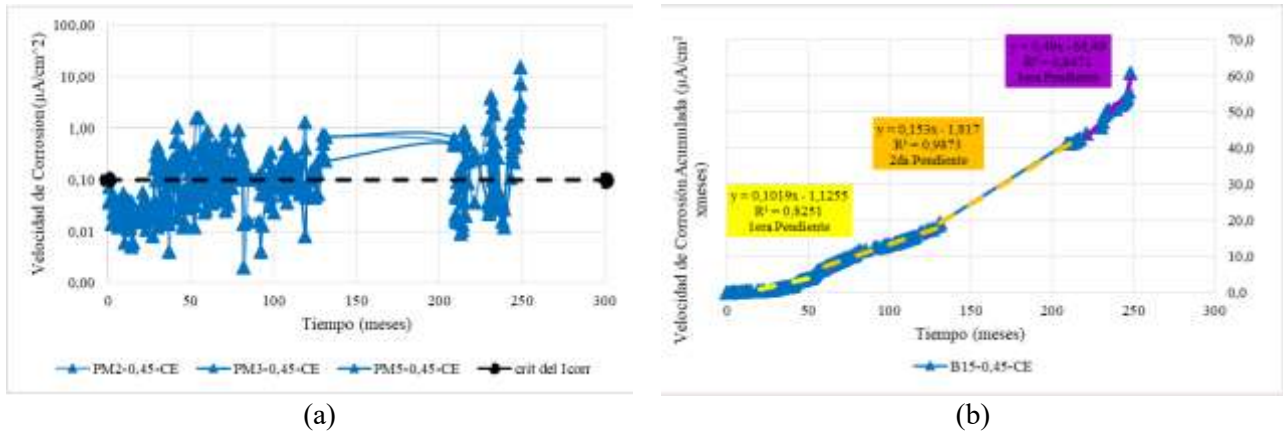


Figura 3. Velocidad de corrosión natural (a) y velocidad de corrosión acumulada (b) del acero a 15 mm de profundidad de probetas en medio marino acelerado de relación a/c de 0,45.

Conclusiones

La estimación de la vida útil mediante la velocidad de corrosión acumulada y el análisis de cambios de pendiente demostró ser una herramienta eficaz y sencilla para identificar las etapas de iniciación, propagación y vida residual del acero de refuerzo en concreto armado expuesto a ambientes urbano y marino acelerado. En probetas expuestas al ambiente urbano con relación $a/c = 0,65$, la segunda pendiente (inicio de corrosión activa) se identificó alrededor de 90 meses y la tercera pendiente (vida residual y aparición de grietas por corrosión) alrededor de 240 meses, periodo en el cual se observó el inicio de grietas por corrosión. En las probetas de relación a/c de 0,45 no mostraron cambios de pendiente relevantes durante el periodo de estudio y permanecen en la fase de ingreso de contaminantes (no mayor a $0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2 \times \text{meses}$) su comportamiento indica mayor durabilidad y sugiere que, con las condiciones evaluadas, el tiempo hasta la iniciación de la corrosión supera el horizonte temporal aquí evaluado (250 meses). En el medio marino acelerado ($a/c = 0,45$) se observó aceleración de la actividad electroquímica: la transición a corrosión activa se detectó cerca de 50 meses y la vida residual se ubicó aproximadamente a los 210–249 meses, dependiendo de la profundidad de recubrimiento.

Referencias Bibliográficas

ASTM C-876-87. (1987). *Standard test method for half-cell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete*. Philadelphia: American Society for Testing and Materials (ASTM).

Castro Luque, L., Bolognini, H., Herrera, R. I., Rojas, M. A., Anzola de Partidas, E. I. (2008). Evaluación de la corrosión en elementos de concreto armado expuesto al ambiente marino. *Gaceta Técnica de Ingeniería Civil*, 7(1), 33-38.

Majlesi, A., Khodadadi Koodiani, H., Troconis de Rincon, O., Montoya, A., Millano, V., Torres Acosta, A., Rincon Troconis, B. (2023). Artificial neural network model to estimate the long-term carbonation depth of concrete exposed to natural environments. *Journal of Building Engineering*, 74, 106545.

Millano-González, V., Troconis de Rincón, O., Torres-Acosta, A., Sánchez Gómez, M., Castro Borges, P., Pérez-Quiroz, J. T., Pérez-López, T., Vera, R., Salta, M., Pedrón, M. (2023). Modelling electrochemical performance of reinforced concrete in natural marine airborne exposure environments: DURACON Project-10 years evaluation. *Corrosion*, 79(7), 719-731.

Millano-González, Valentina. (2015). *Impacto del medio ambiente y de los materiales en la durabilidad de las estructuras de concreto armado expuestas a medios marinos y urbanos*. Tesis Doctoral. Zulia: Universidad del Zulia.

Rincón, O. T., Carruyo, A. R., Andrade, C., Helene, P. R. L., Díaz, I. (1997). *Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado*. Rio de Janeiro: Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED).

Troconis de Rincón O., Montenegro J.C, Vera R., Carvajal A.M., Mejía de Gutiérrez R., Del Vasto S., Saborío E., Torres-Acosta A., Pérez-Quiroz J., Martínez-Madrid M., Martínez-Molina E., Alonso-Guzman E., Castro-Borges P., Moreno E.I., Almeraya-Calderon F., Gaona-Tiburcio C., Pérez- López T., Salta M., de Melo A.P, Martínez I., Rebolledo N., Rodríguez G., Pedron M., Millano V., Sánchez M., De partidas E., DURACON Collaboration (2015). Concrete carbonation in Ibero-American countries DURACON Project: six-year evaluation. *Corrosion* 71(4), 546-555.

Troconis de Rincón, O; Andrade Perdrix, Carmen CSIC ORCID ; Barboza, M.; Irassar, F.; Montenegro, J. C.; de Lima, M. G.; Helene, P.; Vera, R.; Carvajal, A. M.; de Gutiérrez, R. M.; Del Vasto, S.; Saborio-Leiva, E.; Torres-Acosta, A. A.; Pérez-Quiroz, J. T.; Martínez-Madrid, Miguel; Castro-Borges, Pedro; Moreno, Eric Iván; Salta, M.; de Melo, A. P.; Martínez Sierra, Isabel ; Castellote, Marta ; Rodríguez, G.; Derrégibus, M.; Sánchez, M.; de Partidas, E. A.; Fernández, R. DURACON Collaboration. (2006). Durability of concrete structures: DURACON, an iberoamerican project. Preliminary results. *Building and Environment*, 41, 952-962.

Troconis de Rincón O., Sánchez M., Millano V., Fernández R., de Partidas E.A., Andrade C., Martínez I., Castellote M., Barboza M., Irassar F., Montenegro J.C., Vera R., Carvajal A.M., de Gutiérrez R.M., Maldonado J., Guerrero C., Saborío-Leiva E., Villalobos A.C., Tres-Calvo G., Torres-Acosta A., Pérez-Quiroz J., Martínez-Madrid M., Almeraya-Calderon F., Castro-Borges P., Moreno E.I., Pérez-López T., Salta M., de Melo A.P., Rodríguez G., Pedron M., Derrégibus M. DURACON Collaboration. (2007). Effect of the marine environment on reinforced concrete durability in Iberoamerican countries: DURACON project/CYTED. *Corrosion Science*, 49 (7), 2832-2843.

Troconis de Rincón O., Montenegro J.C., Vera R., Carvajal A.M., de Gutiérrez R.M., Del Vasto S., Saborio E., Torres-Acosta A., Pérez-Quiroz J., Martínez-Madrid M., Lomeli-González M.G., Araujo-Arreola N., Martínez-Molina W., Alonso-Guzmán E., Castro-Borges P., Balancan-Zapata M., Pérez-López T., Sosa-Baz M., Baltazar-Zamora M., Genescá- Llongueras J., Salta M., de Melo A.P., Martínez I., Rebolledo N., Rodríguez G., Pedrón M., Millano V., Sánchez M., de Partidas E., and Mendoza K. DURACON Collaboration. (2016). Reinforced concrete durability in marine environments DURACON Project: long term exposure. *Corrosion*, 72(6), 824-833.

Troconis de Rincón, O., Milano, V., Torres-Acosta, A. A., Hernández-López, Y. (2018). Correlación entre ancho de grietas y velocidad de corrosión en la durabilidad de concreto reforzado en un ambiente marino tropical altamente agresivo. *Revista ALCONPAT*, 8(3), 317-332.

Tuutti, K. (1982). *Corrosion of steel in concrete*. Stockholm: Swedish Cement and Concrete Research Institute.



REVISTA TECNICA

DE LA FACULTAD DE INGENIERIA UNIVERSIDAD DEL ZULIA

Volumen 49. Año 2026, Edición continua_____

Esta revista fue editada en formato digital y publicada en mayo 2026, por el **Fondo Editorial Serbiluz, Universidad del Zulia. Maracaibo-Venezuela**

www.luz.edu.ve

www.serbi.luz.edu.ve

www.produccioncientificaluz.org
