

Análisis de la interfaz concreto-acero en especímenes expuestos a la intemperie e inmersos en agua de mar natural

M. R. Sosa¹, T. Pérez^{1*}, V. M. J. Moo-Yam¹, E. Chávez², J. T. Pérez-Quiroz³

*Autor de Contacto: tezperez@uacam.mx

DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i1.203>

Recepción: 27/06/2017 | Aceptación: 21/12/2017 | Publicación: 31/01/2018

RESUMEN

Se evaluó el comportamiento electroquímico en elementos de concreto armado sin y con adición de cloruro de sodio (NaCl) en el agua de amasado, en un ambiente marino/tropical. El seguimiento consistió en medir potencial de corrosión (E_{corr}), avance del frente de carbonatación (x_{CO_2}) y registro fotográfico de la interfase concreto/acero en diferentes etapas del período de tiempo de exposición. En la exposición a la intemperie se observó que la adición de NaCl en el agua de amasado favoreció el avance de la carbonatación, sin que se visualizara el inicio de corrosión. La presencia de cloruro fue determinante en el inicio y desarrollo del proceso de corrosión, tanto en exposición a la intemperie como en inmersión.

Palabras clave: concreto reforzado; carbonatación; potencial de corrosión; interfase concreto-acero, ión cloruro.

Citar como: M. R. Sosa, T. Pérez, V. M. J. Moo-Yam, E. Chávez, J. T. Pérez-Quiroz (2018), “Análisis de la interfaz concreto-acero en especímenes expuestos a la intemperie e inmersos en agua de mar natural”, Revista ALCONPAT, 8 (1), pp. 16 – 29, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i1.203>

¹ Centro de Investigación en Corrosión de la Universidad Autónoma de Campeche, Av. Heroes de Nacozari No. 480, Campus 6 de Investigaciones, C.P. 24070, San Francisco de Campeche, Campeche, México.

² Secretaria de la Defensa Nacional, Dir. Gral. Ings., U.D.E.F.A., E.M. I. Calz. Mex.-Tac. s/n, Del. Miguel Hidalgo, D. F., México.

³ Instituto Mexicano del Transporte, área Materiales Alternativos Km 12 + 000 carretera Estatal no. 431 El Colorado – Galindo S/N, Sanfandila, Pedro Escobedo. Queretaro, México; C.P. 76703

Información Legal

Revista ALCONPAT es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A. C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel. 5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org
Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

Queda totalmente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la ALCONPAT Internacional A.C.

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el tercer número del año 2018 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del segundo número del año 2018.

Analysis of the concrete-steel interface in specimens exposed to the weather and immersed in natural sea water

ABSTRACT

The electrochemical behavior in reinforced concrete elements without and with addition of sodium chloride (NaCl) in the mixing water, in exposed in a marine/tropical environment was evaluated. The monitoring consisted in measuring corrosion potential (E_{corr}), carbonation front advance (x_{CO_2}) and photographic record of the concrete/steel interface at different stages of the exposure time period. In the outdoor exposure it was observed that the addition of NaCl in the mixing water favored the advancement of carbonation, without showing the beginning of corrosion. The presence of chloride was determinant in the beginning and development of the process of corrosion, as much in exposure to the intemperie as in immersion.

Keywords: Electrochemical behavior, reinforced concrete, carbonation, corrosion potential, chloride.

Análise da interface concreto-aço em corpos de prova expostos à intempérie e imersos em água do mar natural

RESUMO

O comportamento eletroquímico em estruturas de concreto armado sem e com adição de cloreto de sódio na água de amassar, em um ambiente marinho/tropical é avaliado. O monitoramento consistiu em medir o potencial de corrosão (E_{corr}), o avanço da frente de carbonatação (x_{CO_2}) e o registro fotográfico da interface concreto/aço em diferentes estágios do período de exposição. Na exposição aos elementos, observou-se que a adição de íons cloreto favoreceu o avanço da carbonatação, sem mostrar o início da corrosão. A presença de cloreto é determinante no início e desenvolvimento do processo de corrosão, tanto na exposição à intempérie quanto na imersão.

Palavras-chave: Comportamento eletroquímico, concreto armado, carbonatação, potencial de corrosão, cloreto.

1. INTRODUCCIÓN

La durabilidad de la infraestructura construida utilizando concreto reforzado depende directamente de la calidad de los materiales y diseño, considerando el servicio que va a prestar y el impacto del medio ambiente particular en que estará situada. Cuando se ha preparado y colado correctamente, proporciona una adecuada protección al acero que puede estar embebido en el concreto y durar varios años sin mostrar algún signo visible de deterioro. Sin embargo, la corrosión del acero de refuerzo ocurre por la destrucción de la película pasivante formada de manera natural sobre la superficie. Esto es factible por dos causas principales: que haya una cantidad suficiente de cloruros u otros iones despasivantes (Rosas et al, 2014), o que disminuya la alcalinidad del concreto al reaccionar con CO_2 presente en el medio ambiente (Helene et al, 2009; Castro et al, 2000a; Papadakis et al, 1991a).

Actualmente, el deterioro del concreto por factores ambientales es un problema importante que se observa en las construcciones (Papadakis et al, 1991b). Para zonas urbanas, el que más se presenta es el proceso de carbonatación. En las regiones costeras los principales agentes agresores son cloruros, sulfatos y humedad (Melchers et al, 2009; Ye et al, 2012; Zirou et al, 2007).

Sin embargo, el CO_2 se está haciendo cada vez más presente en el deterioro del concreto en el sureste de México (Solis et al, 2005; Moreno et al, 2004; Castro-Borges et al, 2013; Castro et al,

2000b). En cuanto a la ciudad de San Francisco de Campeche, sitio experimental de este trabajo, se ha observado que el proceso de ingreso de la brisa marina es condicionado por la dirección de los vientos, de tal manera que, aunque sea zona costera, el depósito de sales en la superficie de elementos de concreto es limitado (Pérez, 2000). Aunque no se tiene presencia de industria, es importante determinar el avance de la carbonatación en elementos de concreto para ser tomado como criterio de durabilidad en construcción (Chavez-Ulloa *et al*, 2013; San Miguel *et al*, 2012). Uno de los parámetros de mayor uso para estimar la condición de la armadura embebida en concreto es la medición del potencial de media celda, también llamado potencial de corrosión (Ecorr). Las normas ASTM C876-09 y NMX-C-495-ONNCCE-2015 establecen intervalos de Ecorr que aproximan al estado superficial de la armadura. Con los valores obtenidos, es factible elaborar un diagnóstico del grado de corrosión de la armadura, con la reserva de complementarlo con mediciones de variables medioambientales, frente de carbonatación y perfil de ingreso de iones cloruro entre otras. Aunque se cuente con técnicas indirectas para conocer el daño por corrosión, la mejor opción, cuando es posible, consiste en observar directamente la superficie del acero y elaborar un registro fotográfico.

Este trabajo presenta el análisis del efecto de dos condiciones de exposición, del contenido de cloruro de sodio y el ataque por carbonatación sobre el deterioro del concreto armado en un medio marino/tropical, en el sureste de México. La presencia de cloruros en las muestras expuestas en la atmósfera (intemperie) son determinantes en la condición de la interfase, reflejándose en el valor del Ecorr, avance del frente de carbonatación y oxidación de los refuerzos. En cuanto a las muestras expuestas en inmersión, el ión cloruro es el principal agente agresor que afecta el proceso de corrosión del refuerzo.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

2.1. Elaboración de Probetas

Para la fabricación del concreto armado se utilizó cemento Portland Tipo I marca comercial de uso común en la región. Los agregados grueso y fino son usuales en la zona, producto de la trituración de roca caliza de Campeche. Se utilizaron varillas de acero comercial convencional de 0.95 cm de diámetro. El cloruro de sodio (NaCl) añadido al agua de amasado fue grado reactivo analítico de marca comercial. El mezclado se hizo con agua potable del suministro municipal. Se fabricaron dos series de 3 especímenes de concreto armado sin y con 3.5% en peso de cloruro de sodio (NaCl) adicionado en el agua de amasado, en similitud a la concentración salina del agua de mar (Genescá, 1994), con una misma relación agua/cemento de 0.66, de acuerdo con las dosificaciones presentes en la Tabla 1 y las dimensiones presentes en la Figura 1.

Tabla 1. Dosificación de las muestras de concreto armado (NOM C-159-85).

Cemento (kg/m ³)	Agregado fino (kg/m ³)	Agregado grueso (kg/m ³)	Agua (kg/m ³)	NaCl (g/l)
312.5	750	687.5	206.25	35
312.5	750	687.5	206.25	0

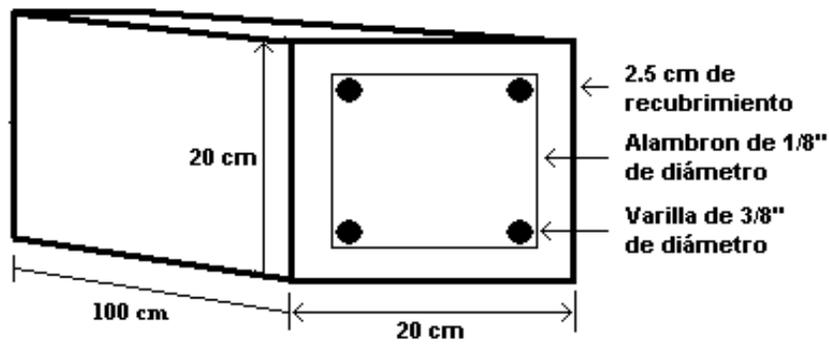


Figura 1. Esquema de los especímenes en estudio.

Se les realizó el curado durante 28 días (NOM C-159-85, ASTM C 192-02) y posteriormente, los especímenes fueron expuestos, en el sureste de México (en la ciudad de San Francisco de Campeche, Campeche, México a 300 metros de la línea costera.), a dos condiciones de exposición: a la intemperie (ATM) y en inmersión en agua de mar natural (INM). Los elementos expuestos a la ATM, se colocaron verticalmente en una base de concreto a 30 cm del suelo. Las probetas expuestas en INM se colocaron en pequeñas piscinas y el agua de mar natural se cambió periódicamente cada mes.

2.2. Medición de Potencial de Corrosión

La medición del potencial de corrosión se realizó de acuerdo con la norma ASTM C876-09. En la Figura 2a se presenta la manera en que se midió el potencial de corrosión en los elementos expuestas a la ATM, tomada en cinco puntos en las probetas a diferentes alturas de la superficie del concreto, utilizando un electrodo de referencia de cobre-sulfato de cobre saturado ($\text{Cu}/\text{CuSO}_4(\text{sat})$). La medida del potencial de corrosión en los especímenes expuestos en INM se realizó utilizando un electrodo de referencia de plata-cloruro de plata saturado ($\text{Ag}/\text{AgCl}(\text{sat})$) inmerso en el agua de mar a un costado de la muestra, ver la Figura 2b.

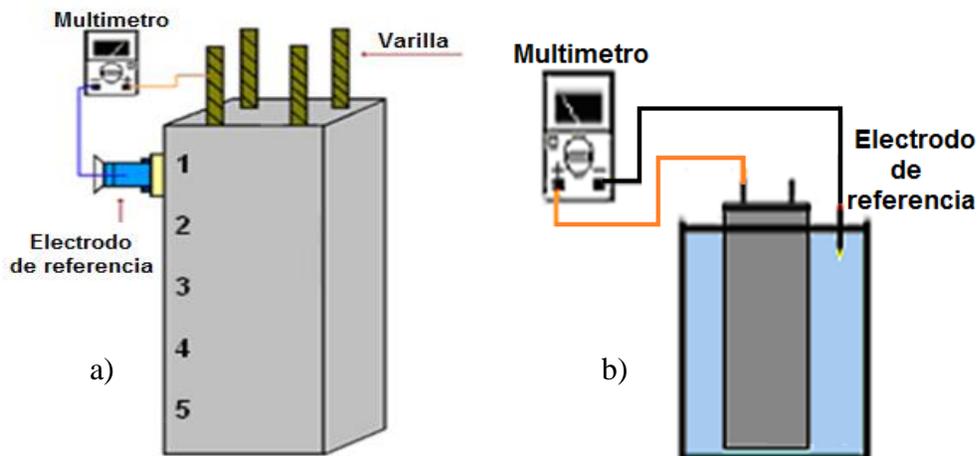


Figura 2. Esquema de la medición de potencial de corrosión: a) a la ATM y b) en INM.

La Tabla 2 presenta el criterio propuesto para analizar los potenciales de corrosión del acero de refuerzo (E_{corr}) embebido en concreto. El análisis de potenciales de corrosión se centrará en función del electrodo de referencia de plata-cloruro de plata saturado ($\text{Ag}/\text{AgCl}(\text{sat})$), por lo que se realizó la conversión de los potenciales de corrosión obtenidos con el electrodo de referencia de cobre-sulfato de cobre saturado sumando +50 mV (Berkeley, 1990; Chess, 1998).

Tabla 2. Criterio para medir el potencial de corrosión del acero de refuerzo en concreto (ASTM C876-09).

E_{corr} vs Cu/CuSO _{4(sat)} (mV)	E_{corr} vs Ag/AgCl _(sat) (mV)	Probabilidad de corrosión
Mayor a -200	Mayor a -150	10% (Zona Pasiva)
Entre -200 y -350	Entre -150 y -300	50% (Zona Incierta)
Menor a -350	Menor a -300	90% (Zona Activa)

2.3. Medición del Frente de Carbonatación

Para esta prueba se extrajeron tres corazones de cada serie utilizando una extractora de corazones, ver Figura 3a (ASTM C42/C42M). Este procedimiento se realizó en 4 periodos de seis meses (6, 12, 18, 24). Se extrajeron los corazones en la parte media y paralelo al acero de refuerzo, ver Figura 3a.

El frente o avance de carbonatación se midió utilizando indicadores ácido-base. La fenolftaleína es el indicador comúnmente utilizado y su intervalo de cambio de color está entre pH 8,2 y 9,8 variando su tonalidad de incoloro a violeta rojizo. La timolftaleína es otro indicador que se utilizó, ya que su intervalo de viraje está entre pH 9,3 y 10,5 con tonalidad de incolora a azul (Trocónis de Rincón *et al*, 1997; Norma UNE-112-011). De esta forma es posible apreciar visualmente el cambio de pH de la pasta de concreto y determinar el avance del frente de carbonatación.

Los indicadores ácido-base se aplicaron hasta 1 cm por debajo del nivel del acero de refuerzo en partes iguales, ver Figura 3b. Se llevó un registro fotográfico del avance de la carbonatación medido mediante una regla. En un concreto de buena calidad se observa el color característico del indicador empleado y un concreto carbonatado se observa la ausencia de color, relacionado a la disminución de pH debido a la reacción del dióxido de carbono (CO₂) con los componentes alcalinos del concreto.

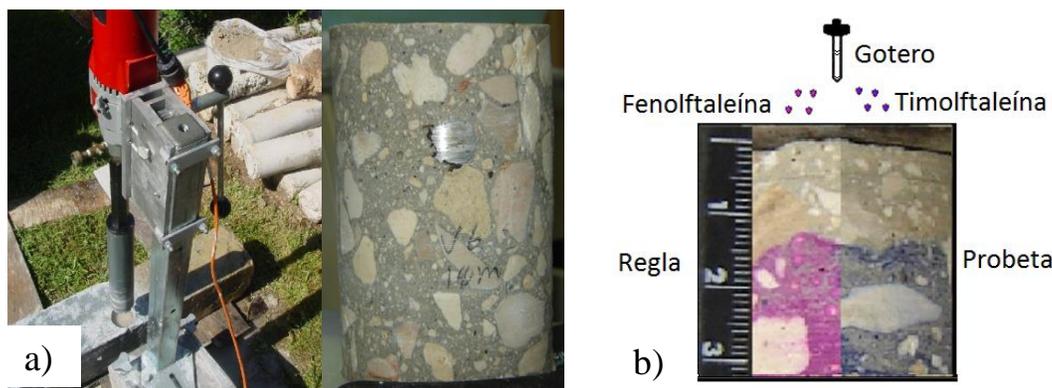


Figura 3. Frente de carbonatación: a) Extracción de corazón y b) Aplicación del indicador.

Los resultados presentan el promedio del avance del frente de carbonatación de los corazones extraídos para determinar visualmente y gráficamente el daño que el medio de exposición generó en el concreto y en consecuencia la probabilidad de que la corrosión del acero de refuerzo se pueda presentar.

3. RESULTADOS

3.1. Frente de carbonatación

En las Figuras 4 y 5 se presenta el registro fotográfico de la velocidad de carbonatación en los corazones de concreto obtenido de especímenes elaborados sin (0%) y con 3.5% en peso de cloruro de sodio (NaCl) adicionado en el agua de amasado, durante dos años de exposición a la ATM e INM, respectivamente.

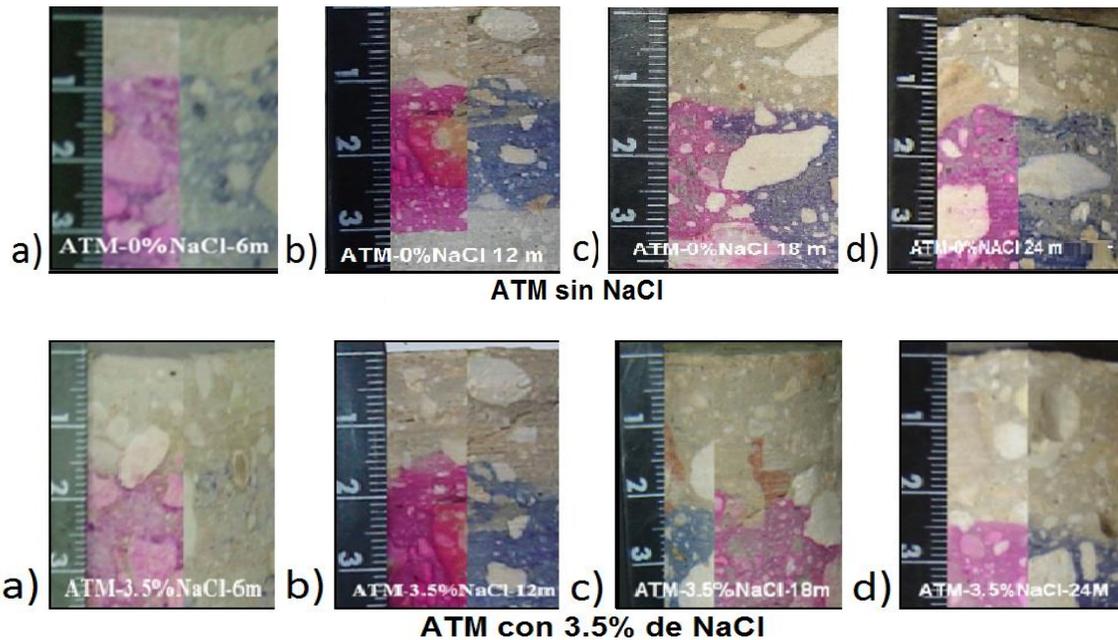


Figura 4. Velocidad de carbonatación: a) 6, b) 12, c) 18 y d) 24 meses, respectivamente sin (0%) y con (3.5%) adición de NaCl, en corazones de concreto expuestas a la ATM.

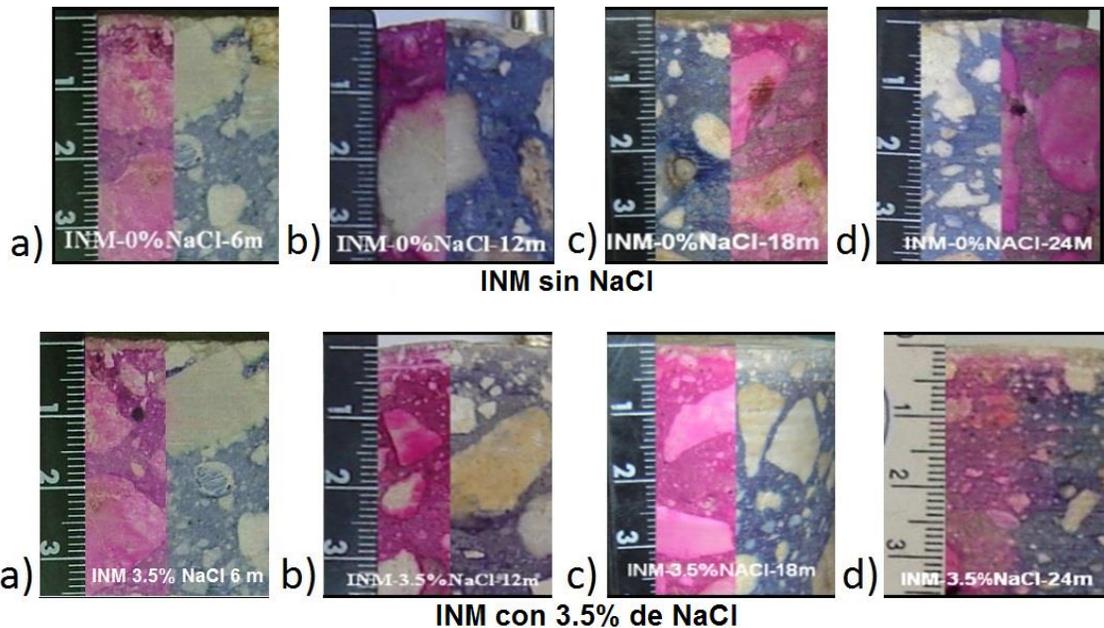


Figura 5. Velocidad de carbonatación: a) 6, b) 12, c) 18 y d) 24 meses, respectivamente sin (0%) y con (3.5%) adición de NaCl, en corazones de concreto expuestas a INM.

En el registro fotográfico de los elementos expuestos a la ATM, en la Figura 4, se observa que las elaboradas sin adición de NaCl presentan un avance en promedio de 8 mm de profundidad a los 6 meses de exposición y una profundidad de 15 mm a los 24 meses. El efecto mas notable se observa en los elementos con adición de NaCl en el agua de amasado que presenta un mayor avance en la carbonatación alcanzando una profundidad de 15 mm en promedio en los primeros 6 meses y 25 mm que en promedio a los 24 meses, alcanzando el nivel del recubrimiento establecido para el acero de refuerzo.

En el caso de los elementos expuestos a INM, Figura 5, se observa un insignificante avance de la carbonatación para ambas condiciones de fabricación de concreto armado, alcanzado en promedio aproximado de 1 mm de profundidad durante los 24 meses que duro el estudio. Los resultados eran los esperados, debido a la baja solubilidad del CO₂ en el agua de mar, cuando los elementos al estar inmersa en el agua de mar.

De acuerdo con el análisis de los resultados del frente de carbonatación, sólo hubo un efecto significativo en los elementos expuestas a ATM relacionadas con el contenido de NaCl adicionado en el agua de amasado que influyó en el avance de la carbonatación en el concreto. En la Tabla 3, se anotan los resultados del promedio de tres muestras. Como se esperaba, la reacción entre el CO₂ y los componentes alcalinos del concreto es favorecida cuando el concreto está entre el 50% y el 80% de contenido de agua en los poros del hormigón, que son las condiciones óptimas para la carbonatación (Pérez, T. et al, 2006; Corvo, F. et al., 2008). Cada condición experimental muestra cercanía en sus valores de k durante el lapso de exposición. Se ha reportado que el patrón de vientos en Campeche, debido a su posición geográfica, es predominante de tierra a mar (Gutiérrez and Winant, 1996) y por esta razón es un medio marino tropical atípico (Pérez, T., 2000).

Tabla 3. Frente de carbonatación de elementos expuestas a la intemperie (ATM).

Tiempo (año)	Avance de carbonatación (mm)		Constante k (mm/año ^{1/2})	
	Sin NaCl	Con NaCl	Sin NaCl	Con NaCl
0.5	8	15	11.3	21.2
1.0	10	17	10.0	17.0
1.5	12	21	9.7	17.1
2.0	15	25	10.6	17.6
Promedio			10.4	18.2

El mayor avance de carbonatación en los elementos con adición de NaCl, se relaciona con que los poros del concreto se mantuvieron parcialmente saturados un mayor tiempo, en condiciones que favorecieron el ingreso del CO₂ y en consecuencia se incrementó la reacción con los componentes del concreto, acelerando el avance de carbonatación en el concreto (Trocónis de Rincón *et al*, 1997). Esta propuesta coincide debido a la humedad relativa (HR) que impera en esta región de aproximadamente del 70% promedio anual, y principalmente al NaCl debido a su propiedad higroscópica que favoreció mantener la humedad interna. En conjunto propiciaron las condiciones para acelerar el avance de la carbonatación, como se observó en los elementos expuestas a la ATM con adición de NaCl en el agua de amasado (Pérez *et al*, 2010).

El avance de carbonatación en los elementos sin adición de NaCl, aun cuando a dos años no alcanzó el nivel del acero, su constante en promedio de 10.4 mm/año^{1/2} es significativa debido a que estos valores son más parecidos a los reportados en ambientes urbanos (Moreno, et al., 2016). La novedad de estos resultados en un ambiente marino/tropical se relaciona con una mayor cantidad de poro debido a la relación agua/cemento de 0.66 con las que fueron elaboradas. Bajo estas características el avance de la carbonatación dependerá de la humedad relativa del medio

para que permaneciera el tiempo necesario en el interior del concreto y pueda llevarse cabo la reacción del CO_2 con los componentes alcalinos del concreto. Se propone que las características higroscópicas del NaCl favorecen la retención de agua en los poros del concreto, manteniendo las condiciones de humedad propicia para la carbonatación del concreto.

3.2. Potencial de corrosión (Ecorr)

En la Figura 6 se presentan los resultados promedio del Ecorr del acero de refuerzo en elementos de concreto elaborados sin (0%) y con 3.5% en peso de cloruro de sodio (NaCl) adicionado en el agua de amasado, durante 2 años de exposición a la ATM e INM.

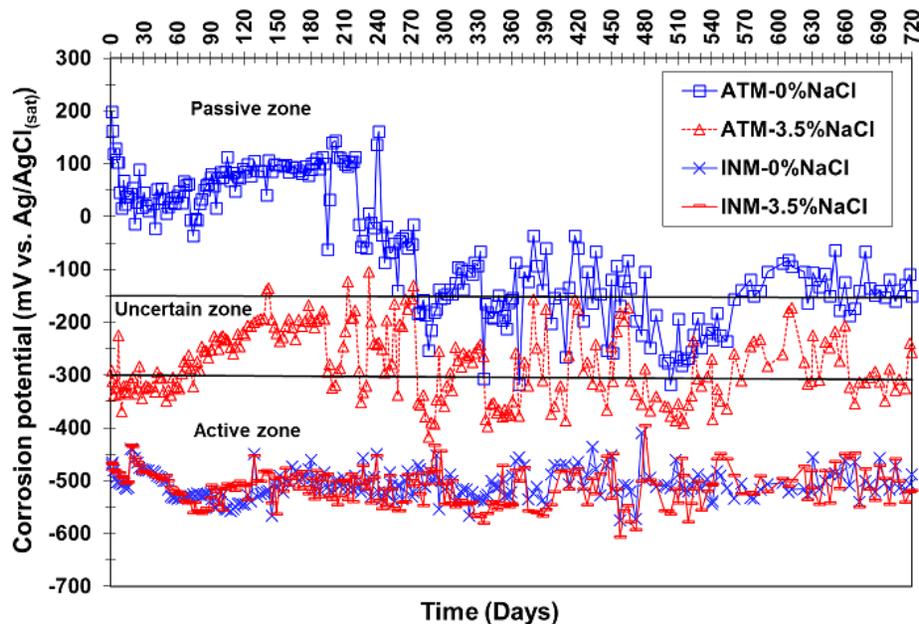


Figura 6. Potencial de corrosión del acero de refuerzo vs. tiempo.

Exposición atmosférica

Los potenciales de corrosión de los elementos elaborados sin adición de NaCl expuestas a la ATM (ATM-0%NaCl), de acuerdo con el criterio de la Tabla 2, mostraron un comportamiento pasivo hasta el día 270; después los potenciales se hicieron más negativos con variaciones entre la zona pasiva e incierta, comportamiento que predominó hasta el término del experimento. En el caso de las elaboradas con adición de NaCl expuestas a la misma condición (ATM-3.5%NaCl), el acero de refuerzo inició con una alta probabilidad de corrosión del acero (zona activa) durante los primeros 40 días, para después disminuir su actividad y permanecer dentro de la zona incierta hasta aproximadamente el día 200 y posteriormente presentar un comportamiento variable hasta el término del estudio, entre la zona activa e incierta. La inestabilidad del Ecorr es debida a las variaciones de las condiciones meteorológicas como temperatura y humedad relativa, así como la temporada de precipitación pluvial.

En las muestras de concreto armado expuestas a la ATM se descartó el efecto de la carbonatación, aunque para la serie con adición de NaCl , este sí alcanzó el nivel del acero hasta los 24 meses. Es notable que el efecto se atribuya principalmente a la acción de los cloruros, que modifican las condiciones de la intercara concreto-acero de refuerzo ocasionando una polarización lo que desplaza el Ecorr a valores más negativos. Caso contrario, cuando se descarta presencia de agentes corrosivos ya sea ataque por CO_2 , cloruros o ambos, como en la serie sin adición de la actividad no se atribuye al inicio de corrosión sino a la saturación parcial de agua de los poros del concreto debido a las condiciones características de la región al estar en un ambiente tropical, donde la humedad relativa predominante en promedio es del 65% al 80%

(Pérez *et al*, 2010). En adición, el hecho que para que se lleve a cabo la reacción de carbonatación se requiere de agua, lo que influyó en parte en el avance de la carbonatación en el concreto para cada serie. Otro aspecto por considerar es la característica química del concreto que rodea al acero de refuerzo, que al inicio del estudio es la primera resistencia contra los agentes que causan la corrosión del acero. Como se observa, las muestras sin adición de NaCl se encuentran pasivas y las fabricadas con adición de NaCl muestran potenciales con alta probabilidad de corrosión.

Exposición por inmersión

En cuanto a los elementos expuestos a INM, ambas series, sin y con 3.5% de NaCl (INM-0%NaCl y INM-3.5%NaCl), se mantuvieron en valores dentro del intervalo entre -400 y -500 mV vs electrodo de Ag/AgCl que corresponde a un comportamiento de alta probabilidad de corrosión del acero de refuerzo (zona activa), durante los 720 días de exposición que duró el experimento. Estos valores pertenecen a la zona de corrosión activa que indica una alta probabilidad de corrosión en el acero de refuerzo. Este comportamiento se debe a la polarización inducida por la falta de oxígeno en la interfaz hormigón-varilla que produce el desplazamiento de E_{corr} a valores más negativos (Ávila, et al., 1994). Esta condición es predominante sobre la presencia de cloruro en el agua de la mezcla.

En el caso de las series expuestas a INM, el ataque por carbonatación es prácticamente nulo, quedando como la causa principal de corrosión los cloruros presentes en el agua de mar y el adicionado en el agua de amasado. En este sentido, ambas series presentaron un mismo comportamiento electroquímico de alta probabilidad de corrosión. Bajo estas características también hay que tomar en cuenta que el acero en condiciones de inmersión se expone a un medio pobre en oxígeno lo que hace que los potenciales sean más negativos, similares a lo reportado.

3.2. Registro fotográfico

En las Figuras 7 y 8 se presenta el registro fotográfico de la inspección visual de la interfase concreto-acero de refuerzo en probetas de concreto elaborados sin (0%) y con 3.5% en peso de NaCl adicionado en el agua de amasado, durante 2 años de exposición a la ATM e INM.

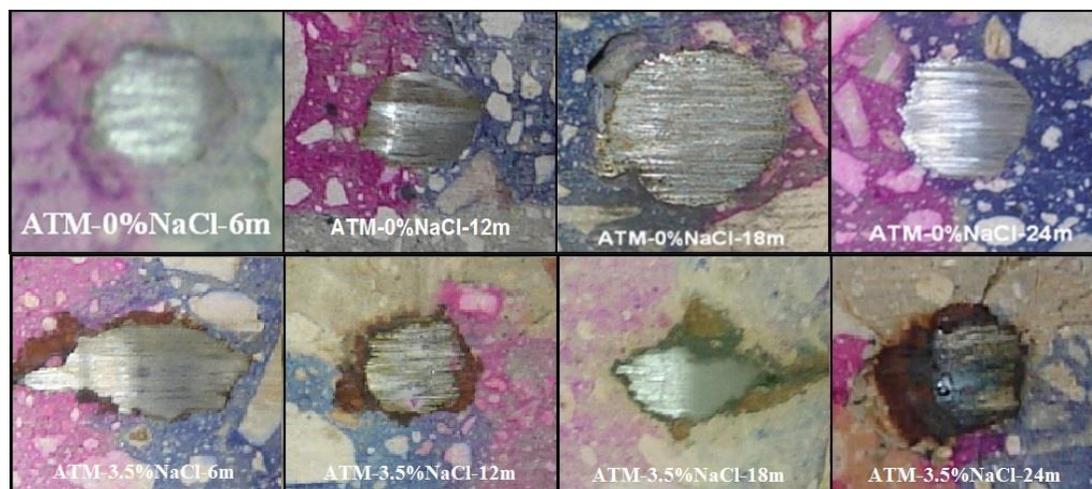


Figura 7. Registro fotográfico a 6, 12, 18 y 24 meses de la interfase concreto-acero en probetas de concreto expuestas a la ATM.

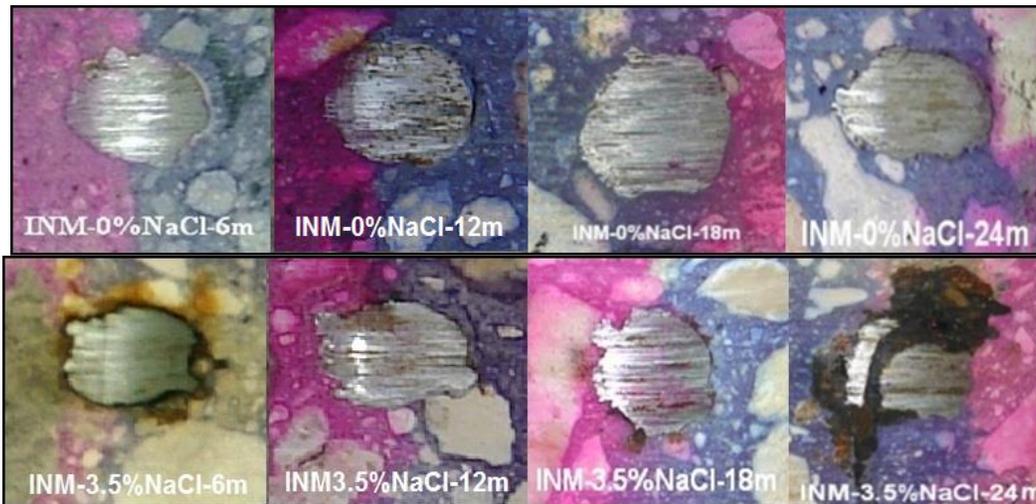


Figura 8. Registro fotográfico a 6, 12, 18 y 24 meses de la interfase concreto-acero en probetas de concreto expuestas a INM.

Exposición atmosférica.

En los elementos fabricados sin adición de NaCl expuestas a la ATM, Figura 7, no se distinguen productos de corrosión en la interfase concreto-acero de refuerzo para los cuatro periodos. Al comparar estos resultados con los elementos con adición de 3.5% de NaCl se observan productos de corrosión en la interfase concreto-acero de refuerzo desde los primeros 6 meses y de forma similar en los tres periodos posteriores hasta el final del experimento de 24 meses.

La ausencia de productos de corrosión en los elementos sin adición de NaCl, expuestas a la ATM, concuerda con el comportamiento electroquímico de pasividad del acero reportado en los potenciales de corrosión los primeros 270 días. Sin embargo, posteriormente pasa a potenciales inciertos de corrosión, comportamiento posiblemente relacionado a la variación de los parámetros ambientales. Al descartarse la acción del CO₂, así como la presencia de cloruros al nivel de la varilla, los potenciales inciertos se atribuyen a variaciones de las condiciones ambientales, al no observarse productos de corrosión durante los 2 años que duró el estudio. Por lo tanto, este comportamiento se atribuye a la humedad relativa, lluvias y temperatura predominantes en el sureste de México, que favorece y da las condiciones para llevar al acero a potenciales a valores inciertos (Pérez et al, 2010).

La presencia de productos de corrosión en las muestras elaboradas con adición de NaCl, expuestas a la ATM, se atribuye principalmente a los cloruros presentes desde el inicio del estudio, al descartarse el efecto de la carbonatación, ya que éste alcanzó el nivel de la varilla hasta los 2 años en que finalizó el estudio. Estos resultados concuerdan con los potenciales de corrosión, sin embargo, con el registro fotográfico no es factible conocer con precisión el tiempo de inicio de la corrosión. Los Ecorr que indican alta probabilidad de corrosión durante los primeros 90 días son evidencia de ataque al acero por la presencia de iones cloruro. En este sentido hay que tomar en cuenta que el concreto recién fabricado cuenta con la propiedad química que protege al acero contra la corrosión. Sin embargo, en condiciones de exposición, el acero logró disminuir su actividad, manteniéndose dentro de potenciales de corrosión de la zona incierta, hasta los 210 días. Por lo tanto, la actividad de corrosión disminuye, con valores de Ecorr menos negativos dentro de la zona incierta. Es evidencia la competencia de reacciones de pasivación-despasivación en la interfaz (Pérez, 2000). En este caso, se observó un efecto similar al reportado para las muestras sin adición de NaCl, aproximadamente a 210 días de exposición, donde la competencia entre el ataque por los cloruros y la protección química del concreto tratan de mantener la capa pasiva en el acero. Esto se atribuye a que los potenciales de corrosión fluctúan entre la zona incierta y la zona activa manteniendo este comportamiento hasta el final

del estudio. En este sentido, bajo las condiciones presentadas los valores inciertos obtenidos están relacionados con el ataque de los cloruros para romper la película pasiva y continuar la corrosión del acero.

Exposición por inmersión

En las expuestas a INM, Figura 8, se observa que en las elementos sin adición de NaCl no se aprecia formación de productos de corrosión significativos en la interfase concreto-acero de refuerzo en los cuatro periodos; mientras que en los elementos con 3.5% de NaCl adicionado en el agua de amasado, la oxidación se detecta a partir de los seis meses después de iniciado el experimento, sin embargo, la corrosión no se completa en la interfase, ya que no toda el área presenta productos de corrosión. Se propone que el daño en la película se vea limitado por la falta de oxígeno debido a la inmersión en agua de mar, por lo que el ión cloruro es el causante de la corrosión.

En las muestras elaboradas con adición de NaCl expuestas a INM, la presencia de óxidos en la interfase concreto-acero de refuerzo en las cuatro etapas del registro fotográfico coincide con los resultados de potenciales de corrosión de alta probabilidad de corrosión obtenidos en los 2 años de estudio. Esto se atribuye principalmente a los cloruros que fueron adicionados en el agua de amasado desde la elaboración de los elementos de concreto, al descartarse el ataque por el CO₂.

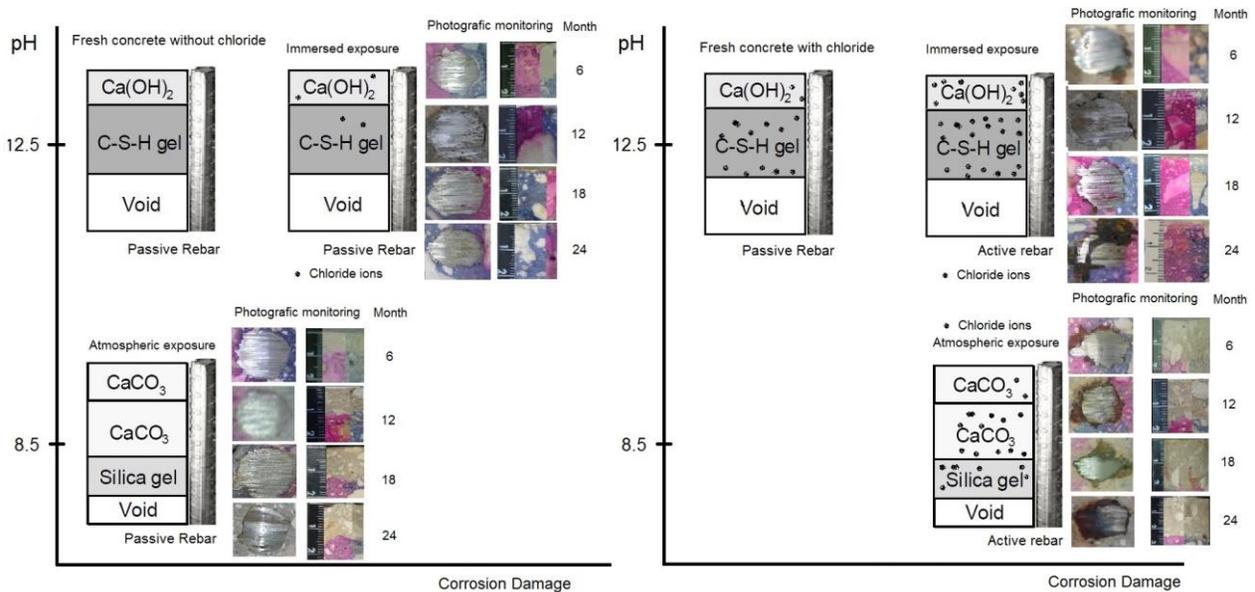


Figura 9. Resumen del progreso de daños en el concreto reforzado bajo las condiciones de exposición analizadas.

La presencia del agente agresivo es el factor determinante para que se inicie la corrosión en el acero de refuerzo siempre y cuando las condiciones sean favorables. Como es este caso y el observado en las muestras con adición de NaCl expuestas a la ATM. Caso contrario se vio en las muestras sin adición de NaCl expuestas a la ATM y a INM donde se descartó la acción del CO₂ y posible ausencia de cloruros a nivel de la varilla, quedando como influencia del comportamiento electroquímico solo las condiciones ambientales características del sureste de México y en el agua de mar. En este sentido, es importante determinar la presencia del agente corrosivo para poder comprender e interpretar los potenciales de corrosión, tal y como se observó en las muestras elaboradas sin y con adición de NaCl. Ya que al conocer la presencia del agente corrosivo y también la presencia significativa de agua, elemento importante y necesarios para que se puedan llevar a cabo las reacciones químicas de degradación del concreto y como consecuencia la corrosión del acero de refuerzo.

De manera general, los Ecorr concuerdan con el registro fotográfico a partir de los 6 meses. Los potenciales por sí solos no aportan información de cuando pudiera haber iniciado significativamente la corrosión del acero, como se observó en las muestras expuestas a la ATM con 3.5% NaCl. Solamente se tiene la certeza que la corrosión es inevitable cuando los cloruros ya están presentes al nivel del acero de refuerzo.

La Figura 9 ejemplifica el daño encontrado los especímenes. Para las expuestas a la ATM, es evidente que la carbonatación conduce a una disminución del pH del material, aunque no lo suficiente para activar el acero, tanto para las muestras elaboradas sin y con NaCl. Mientras tanto, los iones de cloruro existentes alcanzan el punto crítico para iniciar el brote de corrosión sólo para las muestras elaboradas con NaCl. En los especímenes inmersos en agua de mar, el detonador es el ión cloruro, como se observa en la existencia de óxidos desde el primer período de exposición para las muestras elaboradas con NaCl. Las elaboradas sin NaCl no desarrollaron corrosión en la interfase concreto-acero.

4. CONCLUSIONES

La carbonatación no fue un factor para el desarrollo de la corrosión en muestras de hormigón armado expuesto a condiciones atmosféricas ni en inmersión. Solo las muestras preparadas con adición de NaCl en el agua de mezclado, expuestas al ATM, alcanzaron 25 mm de profundidad a nivel de la varilla, pero hasta 2 años después del inicio del estudio. Para las muestras sin adición de NaCl, el avance de la carbonatación fue menor, con una profundidad promedio de 15 mm al final del estudio.

La adición de NaCl en el agua de mezclado y el ambiente característico del sureste de México favoreció el avance de la carbonatación para las muestras expuestas a la intemperie, alcanzando el nivel del acero en dos años del estudio, a diferencia de los elementos a las que no se añadió NaCl. Esto se debe a las propiedades higroscópicas del NaCl, que junto con la humedad relativa que prevalece en el ambiente marino tropical, mantienen la humedad en los poros del concreto por más tiempo, lo que es propicio para las reacciones de carbonatación con los componentes alcalinos del concreto.

En las muestras sin adición de NaCl, expuestas a ATM e INM, no se observaron productos de corrosión en la interfaz de hormigón y acero, la evidencia de que los iones cloruro son el factor determinante para despasivar la interfaz.

En el caso de muestras con adición de NaCl, se observó corrosión en la interfase hormigón-acero, que está de acuerdo con los potenciales de corrosión, para ambas condiciones ambientales. Este comportamiento se atribuyó principalmente a los cloruros, ya presentes en la elaboración de las muestras en la interfaz de acero de refuerzo de hormigón. Por lo tanto, los cloruros fueron el agente principal para iniciar y desarrollar el proceso de corrosión, siendo la evidencia la presencia de productos de corrosión en la interfaz hormigón-varilla en ambas series de muestras elaboradas con NaCl en el agua de mezclado.

La inspección visual de la interfaz concreto-acero de refuerzo fue decisiva para confirmar los intervalos de valores de los potenciales de corrosión del acero de acuerdo con las variables analizadas.

Los resultados obtenidos confirman que los potenciales de corrosión pueden dar lugar a inferencias inciertas cuando los poros del hormigón están saturados de agua. Por lo tanto, se sabe que, si el agente corrosivo ha alcanzado el nivel de la varilla, ofrece una mayor certeza para determinar la probabilidad de corrosión en el acero de refuerzo, como se observó al comparar las muestras preparadas sin y con la adición de NaCl expuestas a ATM y INM. Esto está relacionado con el tipo de exposición que llevó a potenciales a valores más negativos, debido al acceso

limitado de oxígeno por saturación de agua, en los poros del concreto, y no por la corrosión del acero, como fue confirmado por el registro fotográfico.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al CONACYT (proyectos CB-2008-01101891 y CB-2002-C01-40484) por el apoyo parcial.

6. REFERENCIAS

ASTM International (2002), “ASTM C192/C192M-02 Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory”. Retrieved from https://doi.org/10.1520/C0192_C0192M-02.

ASTM International (2009), “ASTM C876-09 Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete”. Retrieved from, <https://doi.org/10.1520/C0876-09>.

ASTM International (2012), “ASTM C42/C42M-12 Standard Test Method for Obtaining and Testing Drilled Cores and Sawed Beams of Concrete”. Retrieved from https://doi.org/10.1520/C0042_C0042M-12.

Berkeley, K. G., Pathmanaban, S. (1990), “Cathodic protection of reinforcement steel in concrete”, Ed. Butterworths, United Kingdom, ISBN 0-408-03270-1.

Castro, P., Moreno, E. I. and Genescá, J. (2000a), “Influence of marine micro-climates on carbonation of reinforced concrete buildings”. Cement and Concrete Research V. 30, pp. 1565-1571, [http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00344-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00344-6).

Castro, P., Sanjuan, M. A. and Genesca, J. (2000b), “Carbonation of concretes in the Mexican Gulf”, Building and Environment., V. 35, pp. 145-149, [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(99\)00009-8](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(99)00009-8)

Castro-Borges, P., Veleva, L., Balancán-Zapata, M., Mendoza-Rangel, J. M., Juárez-Ruiz, L. A. (2013), “Effect of environmental changes on chemical and electrochemical parameters in reinforced concrete. the case of a tropical marine atmosphere”, International Journal of Electrochemical Science, V. 8, Issue 5, pp. 6204-6211.

Chávez-Ulloa, E., Pérez-López, T., Reyes Trujeque, J., Corvo, Pérez, F. (2013), “Deterioro de elementos de concreto en medio ambiente marino tropical y cámara de carbonatación acelerada”, Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia, V. 36, pp 104-113.

Chess, P., Gronvold and Karnov, (1998), “Cathodic protection of steel in concrete”, E&FN Spon, United Kingdom, ISBN 0-419-23010-6.

Corvo, F., Pérez, T., Martín, Y., Reyes, J., Dzib, L. R., González-Sánchez, J., Castañeda, A. (2008), “Time of wetness in tropical climate: Considerations on the estimation of TOW according to ISO 9223 standard”, Corrosion Science, V. 50, pp. 206–219.

Genescá, J. (1994). *Más allá de la Herrumbre III: Corrosión y medio ambiente*. 1ra Edición. Fondo de Cultura Económica. México, D.F.

Gutiérrez, G. and Winant, C. D. (1996) “Seasonal patterns of winds stress and wind stress curl over the Gulf of Mexico”. Journal of Geophysical Research, Vol. 101, No. 8, pp. 127.

Helene, P., Castro-Borges, P. (2009), “A novel method to predict concrete carbonation”, Concr. Cem. Investig. Desarro. V. 1, No. 1, pp. 25-35.

Melchers, R. E., Li, C. Q. (2009), “Reinforcement corrosion initiation and activation times in concrete structures exposed to severe marine environments”, Cement and Concrete Research, V. 39, issue 11, 1068, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.07.003>.

Moreno, E. I., Domínguez Lara, G. G., Cob Sarabia, E. J., Duarte Gómez, F. (2004), “Efecto de la relación agua/cemento en la velocidad de carbonatación del concreto utilizando una cámara de aceleración Ingeniería”, Ingeniería, V. 8, No. 2, pp. 117-130.

- NMX-C-495-ONNCCE-2015 (2015), "*Industria de la construcción – Durabilidad de estructuras de concreto reforzado – Medición de potenciales de corrosión del acero de refuerzo sin revestir, embebido en concreto – Especificaciones y método de ensayo*".
- NOM C-159-85 (1985), "*Concreto Elaboración y Curado en Laboratorio de Especímenes*".
- Papadakis, V. G., Vayenas, C. G., Fardis M. N. (1991a), "*Fundamental modeling and experimental investigation of concrete carbonation*". ACI Materials Journal, V. 88, No. 4, pp. 363-373.
- Papadakis, V. G., Vayenas, C. G., Fardis M. N. (1991b), "*Physical and chemical characteristics affecting the durability of concrete*", ACI Materials Journal., V. 88, No. 2, pp. 186-196.
- Pérez, T., Castro, P., Genescá, J. (2006), "*Influence of meteorological parameters over the chloride ingress to concrete exposed to marine environment*". II Congreso Nacional ALCONPAT México 2006, 8 y 9 de Noviembre de 2006, Tampico, Tamaulipas, México ISBN 968 – 9031 -14 – 7.
- Pérez, T. (2000), "*Kinetics study of the concrete steel embedded reinforcement subject to different exposure conditions at marine environment*", PhD thesis, UNAM, México.
- Pérez, T., Sosa, M. R., Dzib, L. R., Reyes, J., Camacho, R., Troconis-Rincon, O. y Torres-Acosta, A. (2010), "*Reinforced concrete beams deterioration in tropical marine environment: DURACON-Campeche*". Concrete Under Severe conditions – Castro Borges et al (eds), Editorial Taylor & Francis Grup, London, pp. 413-420, ISBN: 978-0-415-59316-B.
- Rosas, O., Maya-Visuet, E., Castaneda, O. (2014), "*Effect of chloride ions on the electrochemical performance of LDX 2003 alloy in concrete and simulated concrete-pore solutions*", J. Appl. Electrochem., V. 44, issue 5, pp. 631-646, DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s10800-014-0668-0>.
- San Miguel, G. F., Tamez, P. V., Alvarado, M. R., Alcorta, R. G., Garza, R. M., Farias, J. P. (2012), "*Deterioro por corrosión de elementos de concreto armado de un edificio industrial*". Revista ALCONPAT, V. 2, No., 3, pp. 195 – 210. DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v2i3.38>.
- Solís Carcaño, R. G., Moreno, E. I., Castro Borges, P. (2005), "*Durabilidad en la estructura de concreto de vivienda en zona costera. Ingeniería*", Ingeniería, V. 9, pp. 13-18.
- Trocónis de Rincón, O. (1997), "*Manual for inspecting, evaluating and diagnosing corrosion in reinforced concrete structures*". DURAR Network Members. CYTED. ISBN 980-296-541-3, Maracaibo, Venezuela. 1997/1998/2001 (1st ed. 2nd ed. and 3rd ed. in Spanish), 2000 (1st ed. in English).
- Trocónis de Rincón, O., Sánchez, M., Millano, V., Fernández, R., de Partidas, E. A., Andrade, C., Martínez, M., Castellote, M., Barboza, F., Irassar, J. C., Montenegro, R., Vera, A. M., Carvajal, R. M., de Gutiérrez, I., Maldonado, J., Guerrero, C., Saborio-Leiva, E., Villalobos, A. C., Tres-Calvo, G., Torres-Acosta, A., Pérez-Quiroz, J., Martínez-Madrid, M., Almeraya-Calderón, F., Castro-Borges, P., Moreno, E. I., Pérez-López, T., Salta, M., de Melo, A. P., Rodríguez, G., Pedrón, M., Derrégibus, M. (2007) "*Effect of the marine environment on reinforced concrete durability in Iberoamerican countries: DURACON project/CYTED*", Corrosion Science, V. 49, Issue 7, pp. 2832-2843.
- UNE-112-011 (1994), "*Corrosión en armaduras. Determinación de la profundidad de carbonatación en hormigones endurecidos y puestos en servicio.*", Madrid, Ed. AENOR.
- Ye, H., Jin, N., Jin, X. and Fu, C. (2012), "*Model of chloride penetration into cracked concrete subject to drying-wetting cycles*", Construction and Building Materials, V. 36, pp. 259-269.
- Zitrou, E., Nikolaou, J., Tsakiridis, P. E. and Papadimitriou, G. D. (2007), "*Atmospheric corrosion of steel reinforcing bars produced by various manufacturing processes*", Construction and Building Materials, V. 21, Issue 6, 1161-1169, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.06.004>.