



## Calidad del proceso de pasivación en concreto reforzado: efectos de la periodicidad de la polarización y los parámetros de la consolidación de la pasivación en el procesamiento de datos

J. A. Briceño-Mena<sup>1</sup> , M. G. Balancán-Zapata<sup>1</sup> , P. Castro-Borges<sup>1\*</sup> 

\*Autor de Contacto: [pcb1963@gmail.com](mailto:pcb1963@gmail.com)

DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v10i2.466>

Recepción: 13/12/2019 | Aceptación: 24/04/2020 | Publicación: 30/04/2020

### RESUMEN

La calidad del proceso de pasivación se estudió considerando la periodicidad de polarización, los parámetros de consolidación de pasivación y el tratamiento de datos. Algunas investigaciones han abordado la calidad del proceso de pasivación, pero su estudio se complica por la limitación de los datos de la era analógica, la dispersión de éstos y la interpretación de la velocidad de corrosión. Se construyeron dos series de especímenes de concreto reforzado utilizando dos relaciones agua/cemento y dos combinaciones de curado/almacenamiento y se expusieron en un medio marino. La periodicidad de la polarización no tuvo efecto sobre la pasivación/despasivación durante la pasivación, sino sobre el tratamiento de los datos. El proceso de curado y almacenamiento influyó en la tendencia a la despasivación. El tipo de almacenamiento posterior al curado afectó la velocidad de corrosión acumulada de 1 a 5  $\mu\text{A}\cdot\text{día}/\text{cm}^2$ ; esto es equivalente al margen de incertidumbre en la interpretación.

**Palabras clave:** velocidad de corrosión acumulada; relación a/c; concreto reforzado; ambiente tropical marino.

**Citar como:** Briceño-Mena, J. A., Balancán-Zapata, M. G., Castro-Borges, P. (2020), “Calidad del proceso de pasivación en concreto reforzado: efectos de la periodicidad de la polarización y los parámetros de la consolidación de la pasivación en el procesamiento de datos”, Revista ALCONPAT, 10 (2), pp. 243 – 258, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v10i2.466>.

<sup>1</sup>Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN, Unidad Mérida, km. 6 Ant. Carr. a Progreso, 97310 Mérida, Yucatán, México

### 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](mailto:alconpat.int@gmail.com), Página Web: [www.alconpat.org](http://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 primer número del año 2021 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del tercer número del año 2020.



## Passivation process quality in reinforced concrete: effects of polarization periodicity and passivation consolidation parameters on data processing

### ABSTRACT

The passivation process quality was studied considering polarization periodicity, passivation consolidation parameters, and data processing. Passivation process quality in steel reinforcement affects a structure's planned future service life. Some research has addressed this phenomenon, but its study is complicated by the limits of analog-era data, dispersion in corrosion rate data, and their interpretation. Two series of small reinforced concrete specimens were built using two water/cement ratios and two curing/storage combinations and exposed to the marine environment. Polarization periodicity did not affect passivation/depasivation during passivation but on the data processing. The curing and storage process influenced the tendency towards depasivation. Post-curing storage type affected the cumulative corrosion rate from 1 to 5  $\mu\text{A}\cdot\text{day}/\text{cm}^2$ ; this is equivalent to the margin of uncertainty in interpretation.

**Keywords:** cumulative corrosion rate, w/c ratio, reinforced concrete, tropical marine environment.

## Qualidade do processo de passivação em concreto armado: efeitos da periodicidade de polarização e parâmetros de consolidação de passivação no processamento de dados

### RESUMO

A qualidade do processo de passivação foi estudada considerando periodicidade de polarização, parâmetros de consolidação de passivação e processamento de dados. A qualidade do processo de passivação na armadura de aço afeta a vida útil futura planejada de uma estrutura. Algumas pesquisas abordaram esse fenômeno, mas seu estudo é complicado pelos limites dos dados da era analógica, dispersão nos dados da taxa de corrosão e sua interpretação. Duas séries de pequenas amostras de concreto armado foram moldadas usando duas relações água/cimento e duas combinações de cura/armazenamento e expostas ao ambiente marinho. A periodicidade da polarização não afetou a passivação/despasivação durante a passivação, mas no processamento de dados. O processo de cura e armazenamento influenciou a tendência de despasivação. O tipo de armazenamento pós-cura afetou a taxa de corrosão acumulada de 1 a 5  $\mu\text{A}\cdot\text{dia}/\text{cm}^2$ ; isso é equivalente à margem de incerteza na interpretação.

**Palavras-chave:** taxa de corrosão acumulada, relação w/c, concreto armado, ambiente marinho tropical.

## 1. INTRODUCCIÓN

En condiciones naturales se consolida, con el paso del tiempo, una capa de óxidos que protege al acero de refuerzo (Poursae & Hansson, 2007). Esta capa se forma debido a la alta alcalinidad del concreto y se le conoce como capa de pasivación (Andrade et al., 1995). Esta capa provee de una barrera contra agentes agresivos, de cuya estabilidad depende la calidad de la pasivación. Por lo tanto, cuando las estructuras son expuestas a un ambiente natural agresivo, el tiempo para que la pasivación ocurra y se consolide es muy importante ya que de eso dependerá el comportamiento electroquímico del acero de refuerzo y, por lo tanto, su proceso de corrosión (Ahmad & Kumar, 2013), entendiéndose como consolidación la estabilidad electroquímica de la capa pasiva. Existen estudios acerca de la pasivación del refuerzo, así como de las etapas de iniciación y propagación de la corrosión (Andrade et al., 1995; Huet et al., 2005; Jiang et al., 2017). Sin embargo, los



objetivos de estos estudios no necesariamente contemplaban proveer los tiempos adecuados al acero para consolidar la pasivación (Poursae & Hansson, 2007). Además, la variabilidad en los métodos de estudio de la pasivación (Alonso et al., 2000; Jiang et al., 2017; Page, 2009; Poursae & Hansson, 2007) puede causar discrepancia en la interpretación de la misma, provocando que se tengan valores de sobreestimación o subestimación. Los datos sobre corrosión en concreto reforzado se expresan comúnmente como velocidad de corrosión instantánea,  $i_{\text{corr}}$ , en función del tiempo (Alonso et al., 2000; Andrade & Alonso, 1996; Castro-Borges et al., 2013; Castro-Borges et al., 2017; Lopez & Gonzalez, 1993; Pech-Canul & Castro, 2002; Pedrosa & Andrade, 2010; Rebolledo & Andrade, 2010). Muchos estudios incluyen análisis del comportamiento de  $i_{\text{corr}}$  desde la zona de pasivación hasta el momento en que comienza a mostrar signos claros de despasivación. Esto ayuda a evaluar la resistencia a la corrosión de diferentes materiales. Algunas obras de antes del año 2000 (Alonso et al., 2000; Andrade & Gonzalez, 1978; Lopez & Gonzalez, 1993) y después del año 2000 (Ghods et al., 2009; Pech-Canul & Castro, 2002; Poursae & Hansson, 2007), abordan los fenómenos que ocurren antes de la despasivación. Sin embargo, la limitación del uso de datos analógicos y la dispersión intrínseca de los datos de  $i_{\text{corr}}$  han retrasado una comprensión más profunda de las tendencias de  $i_{\text{corr}}$  en la zona de pasivación. Estudios previos (Andrade & Alonso, 1996; Castro-Borges et al., 2013, 2017; Melchers & Li, 2006; Pedrosa & Andrade, 2010; Rebolledo & Andrade, 2010) incluyen análisis de zonas de pasivación y algunos de ellos encontraron interpretaciones de las tendencias de los datos mediante la aplicación de un procesamiento matemático directo, que por supuesto necesitaría ser confirmado bajo diferentes condiciones de exposición.

La práctica actual de diseñar estructuras de concreto reforzado con una vida útil de casi cien años implica la aplicación de criterios de durabilidad para evitar la corrosión. Esto requiere una comprensión mucho más profunda de la corrosión en la zona de pasivación. Alcanzar la estabilidad y durabilidad de la zona de pasivación requiere una calidad óptima del concreto (condiciones de curado, relación agua/cemento), conocimiento del ambiente de exposición (vientos predominantes y no predominantes, el régimen de temperatura y humedad relativa) y medidas de prevención de daños (recubrimiento de concreto, sellado de superficie) entre otros factores. Una combinación inadecuada de estos a una edad temprana puede afectar negativamente la calidad de pasivación y la vida útil futura. El estudio de la calidad de la pasivación en el refuerzo de acero embebido en el concreto es vital, ya que puede afectar significativamente el comportamiento electroquímico posterior y, en consecuencia, la vida útil de la estructura a corto, mediano y largo plazo.

Sin embargo, los procedimientos de rutina para estudios de campo a largo plazo, con una variedad de objetivos combinados y diferentes materiales, no permiten fácilmente un estudio detallado de la calidad de la pasivación a una edad temprana y, por lo tanto, el impacto de esta situación no se conoce en la vida útil de las estructuras. Un ejemplo de esto suele ser cuando las mediciones se realizan en el campo a intervalos de baja periodicidad. Esta situación podría enmascarar tendencias que podrían ser útiles para los modelos de vida útil. Por estas razones, surgieron dudas después de más de diez años de experimentación (desde 2007) en especímenes de campo en los que se esperaba un proceso de despasivación relativamente temprano, lo que no ocurrió. Luego, se decidió hacer, diez años más tarde, otro conjunto de muestras (en 2017), en el que algunos parámetros en su composición y exposición se modificarían para poder analizar con más detalle la calidad de la pasivación.

Por otro lado, estudiar la calidad de la pasivación requiere un conocimiento completo de los criterios generales utilizados para definir una barra de refuerzo como pasiva, en transición o activa. El criterio más aceptado es que la pasivación termina cuando la velocidad de corrosión excede el rango de  $0.1 - 0.2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  (Andrade & Gonzalez, 1978; Berke et al., 1996), aunque algunos criterios ampliamente utilizados incluyen un rango de  $0.1 - 0.5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  (Andrade & Alonso, 1996; NMX-C-501-ONNCE, 2015; Troconis et al., 1998). Para fines prácticos, un criterio conservador de



valores  $< 0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  fue utilizado como indicador de pasividad para concreto reforzado. Teniendo en cuenta lo anterior, el objetivo del presente estudio fue analizar la calidad de la pasivación en el refuerzo del concreto en términos de periodicidad de polarización durante la medición, los parámetros de pasivación y el procesamiento de datos.

Para este trabajo, solo se analizan los datos correspondientes a un recubrimiento de concreto de 20 mm, que es la más relacionada con la situación típica del concreto en la región.

## 2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

### 2.1 Diseño de especímenes

Usando el método de diseño del ACI (ACI 211-91, 2002), se hicieron doce muestras prismáticas (150x150x300 mm) utilizando cemento Portland compuesto (CPC30R) estandarizado por la normativa mexicana (NMX-C-414-ONNCCE, 2014), y el agregado consistió en roca caliza típica del sureste de México. La Tabla 1 presenta las características básicas del concreto: tipo de curado, condición de almacenamiento, cemento y relación a/c, y la Tabla 2 la dosificación del concreto. Cada espécimen fue reforzado con seis barras de acero al carbono de grado 42, barras de 3/8" de diámetro (350 mm de largo), colocadas a profundidades de 15, 20 y 30 mm. Antes de la colocación en las muestras, el área de estudio se delimitó en cada barra, dejando un área despejada de 150 mm de largo en su centro. El resto de la barra se pintó con pintura epoxi y su extremo se cubrió con cinta aislante (Figura 1).

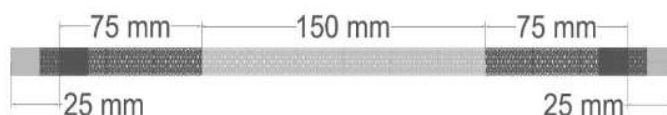


Figura 1. Delimitación de 150 mm del área no protegida en el centro de la barra (zona de estudio)

El concreto se preparó usando dos relaciones de agua/cemento (a/c): 0.45 (considerado concreto de alta calidad en el área de estudio) y 0.65 (considerado de baja calidad). Seis especímenes (especímenes antiguos - 2007) se curaron mediante habitación húmeda durante 28 días y luego se almacenaron durante 233 días. El segundo conjunto de seis (especímenes nuevos - 2017), se curó durante siete días mediante la aplicación directa de agua potable, práctica común en el área de estudio, y se mantuvo almacenado durante 27 días.

Tabla 1. Características básicas del concreto, tipos de curado y almacenamiento

Especímen	Proceso de curado	Condiciones de almacenamiento (sin control de la humedad relativa y temperatura)	Tipo de cemento	Relación agua/cemento
2007	Cuarto húmedo por 28 días	Se mantuvieron en almacenamiento semi controlado por 233 días después del curado	Cemento Portland Compuesto (CPC30R)	0.45 (3 especímenes) 0.65 (3 especímenes)
2017	Agua potable directa, algunas veces por 7 días	Se mantuvieron en almacenamiento semi controlado por 27 días después del curado		0.45 (3 especímenes) 0.65 (3 especímenes)

Tabla 2. Proporciones de mezcla de concreto

Especimen	Relación a/c	Contenido de material (kg/m <sup>3</sup> )				f'c - 28 días (kg/cm <sup>2</sup> )
		cemento	arena	grava	agua	
2007	0.45	408	681	800	287	N/D
	0.65	277	739	868	280	N/D
2017	0.45	456	638	757	205	231
	0.65	315	740	757	205	159

Antes de la exposición, las caras inferior y superior de los especímenes se pintaron con pintura epoxi para limitar la influencia de agentes agresivos únicamente en las caras laterales (Figura 2).

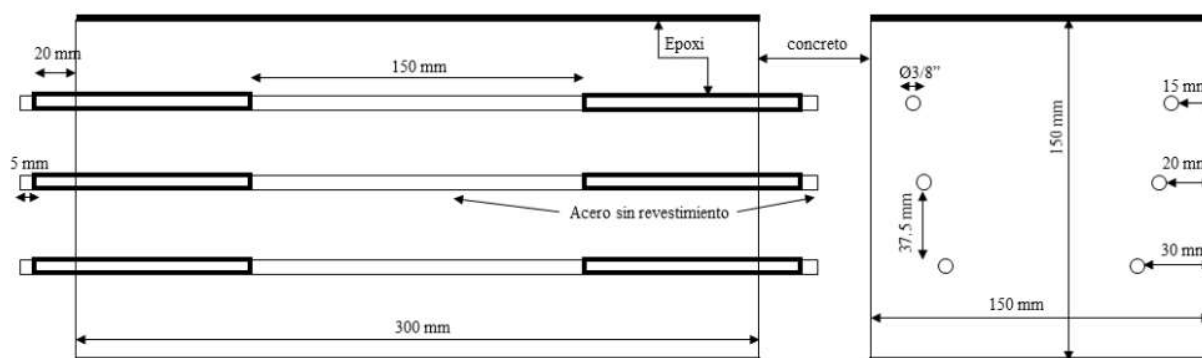


Figura 2. Configuración del espécimen

## 2.2 Ambiente de exposición

Los especímenes fueron expuestos en un ambiente tropical marino en la costa norte de la península de Yucatán, México. Se colocaron en la playa a 50 m de la orilla del mar y a 0,95 m sobre la superficie del suelo, colocando la barra con mayor recubrimiento en la parte inferior de la viga. Se orientaron de manera que estuvieran expuestos a diferentes condiciones climáticas regionales: vientos predominantes del noreste (VP) y vientos no predominantes del suroeste (VNP) (Figura 3). El primer conjunto de especímenes (2007) estuvo expuesto 261 días después de coladas y el segundo conjunto (2017) 34 días después de coladas.



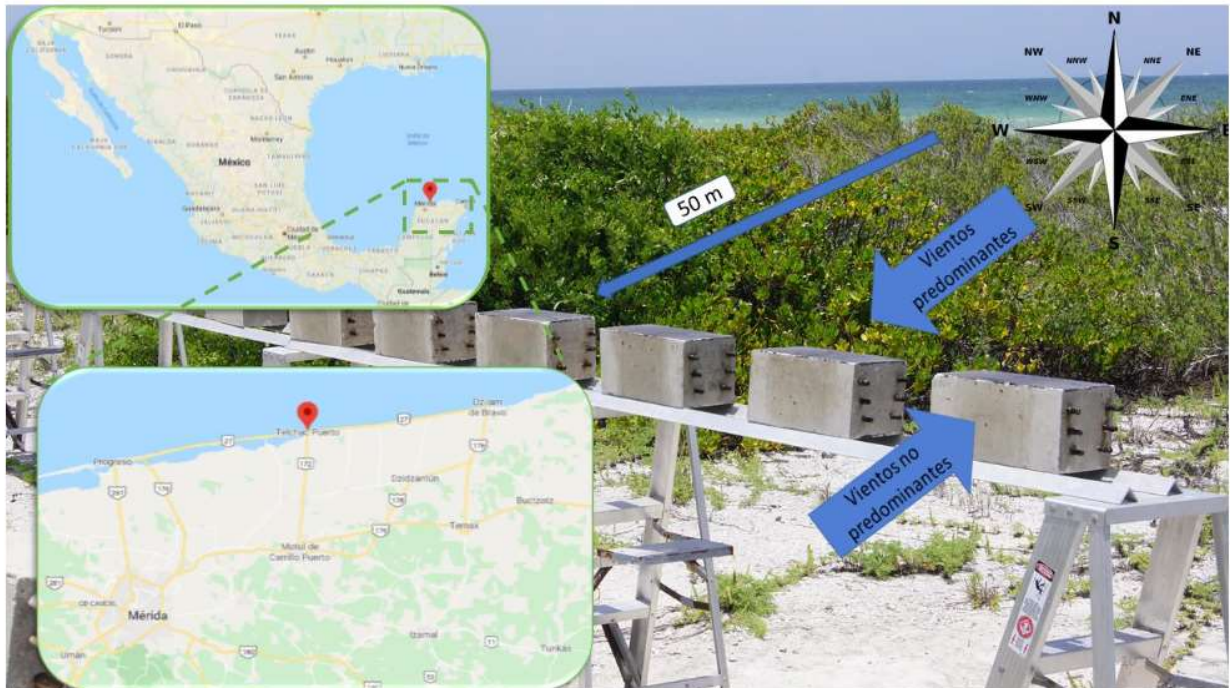


Figura 3. Configuración de la estación para la exposición de las muestras.

### 2.3 Mediciones de corrosión

La velocidad de corrosión del acero de refuerzo ( $i_{corr}$ ,  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ), el potencial de corrosión ( $E_{corr}$ , mV vs. Cu/CuSO<sub>4</sub>), y la resistencia eléctrica del concreto ( $R_s$ , k $\Omega$ ) fueron medidas con un corrosímetro comercial portátil que tiene un sistema de confinamiento y trabaja mediante la utilización de la técnica de la resistencia a la polarización lineal ( $R_p$ ) (Andrade & Alonso, 1996). El valor de la resistividad eléctrica ( $\rho$ , k $\Omega$ -cm) fue calculada con la ecuación (1), donde D es el diámetro de la barra en cm.

$$\rho = 2 R_s D \quad (1)$$

Para los especímenes de 2007, las mediciones electroquímicas se tomaron aproximadamente cada 90 días durante 557 días, mientras que, para el segundo conjunto, 2017, se tomaron cada 14 días durante 279 días.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

### 3.1 Calidad de pasivación a edades tempranas

Para los propósitos de este trabajo, la edad temprana se define como el tiempo durante el cual los especímenes exhibieron un comportamiento electroquímico en la zona de pasivación. La interpretación de los datos de la zona de pasivación se facilitó mediante el uso de un valor límite conservador de  $0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  con un rango de  $0.1 - 0.5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  para la despasivación. La Figura 4 es una gráfica típica utilizada para el registro de  $i_{corr}$  en función del tiempo en especímenes pequeños expuestos a un medio marino natural en diferentes temporadas. A pesar de que se estudiaron tres recubrimientos de concreto (15 mm, 20 mm y 30 mm), este trabajo analiza solo los datos para el recubrimiento de concreto de 20 mm. Este es muy común en la zona marina de la región, aunque las regulaciones aplicables exigen un recubrimiento mayor (NMX-C-530-ONNCCE, 2017). Otras variables fueron la orientación del espécimen (VP y VNP), incluida para



identificar cualquier efecto del viento, y la calidad del concreto (relación a/c 0.45 y 0.65).

En los especímenes de concreto de alta calidad (a/c 0.45), se recolectaron dos tipos de datos, uno para la exposición iniciada en 2007 (Tabla 1 y Figura 4.a) y el otro a partir de 2017 (Tabla 1 y Figura 4.b). El parámetro de calidad similar entre los especímenes estuvo dado principalmente por el tipo de cemento y la relación a/c. Esto se debió a la falta de más información en 2007. Sin embargo, una forma de minimizar la variabilidad del CPC fue comparando elementos de la misma familia (2007 o 2017), donde la diferencia entre los elementos era más notable, de la misma familia, debido a factores más importantes como el curado y el almacenamiento. De hecho, los datos de exposición desde 2007 (Figura 4.a) fueron esencialmente estables durante los primeros 557 días. Los primeros 233 días correspondieron al almacenamiento en un ambiente semi-controlado. Desde el día 233 hasta el día 557, estuvieron expuestos a un ambiente marino tropical, pero la condición de pasivación continuó casi sin cambios.

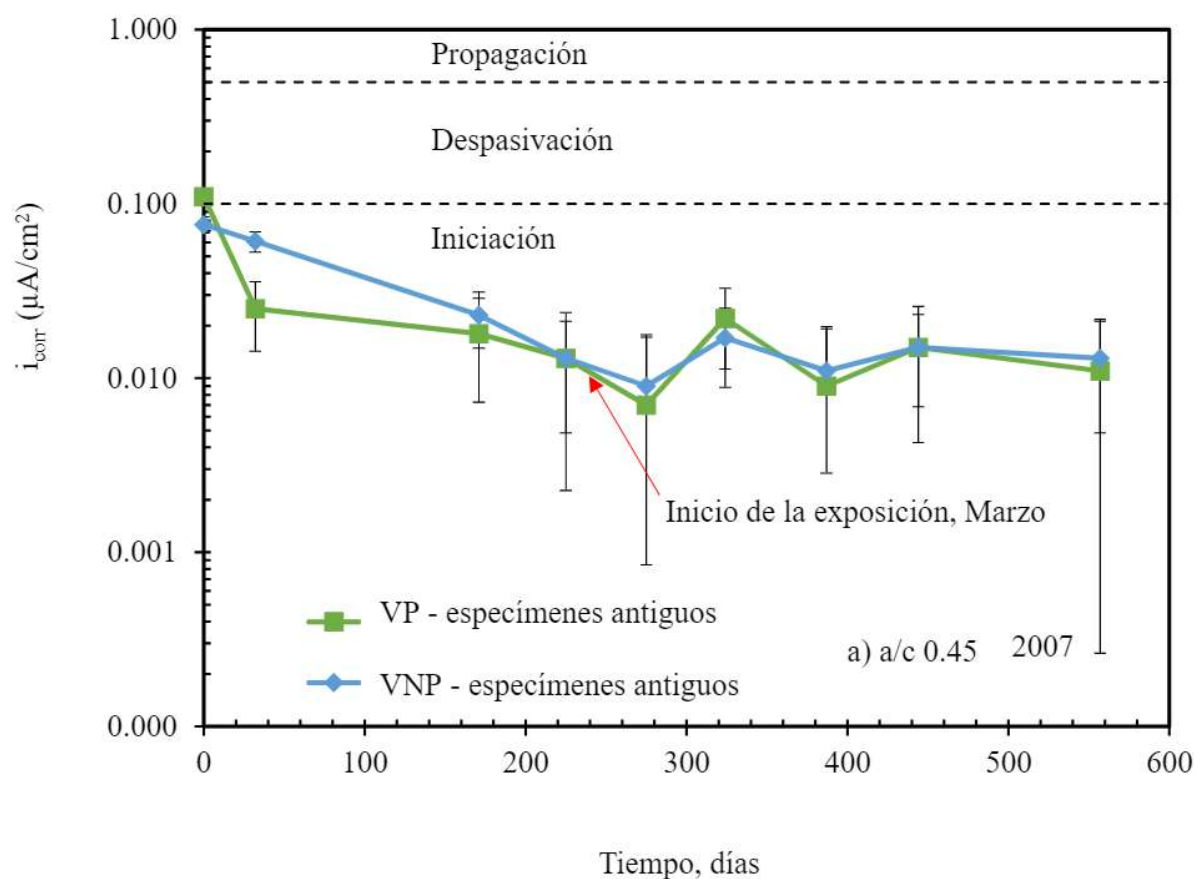
Por otro lado, los datos de exposición de 2017 (Figura 4.b), correspondientes a 27 días en condiciones de laboratorio y 211 días de exposición natural, comenzaron a mostrar diferencias entre VP y VNP. Estas figuras confirman una diferencia entre ambas calidades de pasivación, que se debe principalmente al proceso de curado y almacenamiento adecuado de las muestras durante 233 días en un entorno no agresivo, sin agentes agresivos, para las muestras de 2007. Por lo tanto, la calidad de la pasivación a edades iniciales permitió un mejor comportamiento electroquímico instantáneo posterior para 2007 (Figura 4.a) que para los especímenes de 2017 (Figura 4.b). La respuesta del concreto de baja calidad (a/c 0.65) fue similar a la del concreto de alta calidad (a/c 0.45) tanto para 2007 (Figura 4.c) como para 2017 (Figura 4.d). Sin embargo, los datos instantáneos para ambas relaciones a/c parecen ser un poco diferentes en 2017.

Aunque el comportamiento de la zona de pasivación fue estable, todavía había dudas sobre si hubo momentos en los que, en respuesta a los cambios en la estación (lluviosa y seca), la velocidad de corrosión podría haber excedido los valores de la zona de pasivación. Como parte de un proyecto más grande, los especímenes se construyeron y expusieron en 2017 para otros fines, pero claramente podrían servir para verificar si esto podría influir en la velocidad de corrosión acumulada ( $i_{cum}$ ), como se reportó recientemente (Castro-Borges et al., 2013, 2017; Melchers & Li, 2006; Pedrosa & Andrade, 2010; Rebolledo & Andrade, 2010). A diferencia de los construidos en 2007, estos nuevos fueron expuestos a un medio marino casi inmediatamente después del curado. En una comparación de los dos procesamientos de datos en la misma escala de tiempo (Figuras 4.a a 4.d), los especímenes más nuevos exhibieron un comportamiento más cercano a la zona de despasivación que los especímenes más antiguos para todas las variables estudiadas. El curado, el almacenamiento y las variables ambientales afectaron, en mayor o menor medida, la tendencia a la despasivación. Los parámetros medidos aquí ayudaron a confirmar la calidad del proceso de pasivación en las edades iniciales, independientemente de las variables dependientes (es decir, relación a/c y orientación). Esto afectará la vida útil planificada de los especímenes en términos de despasivación y propagación.

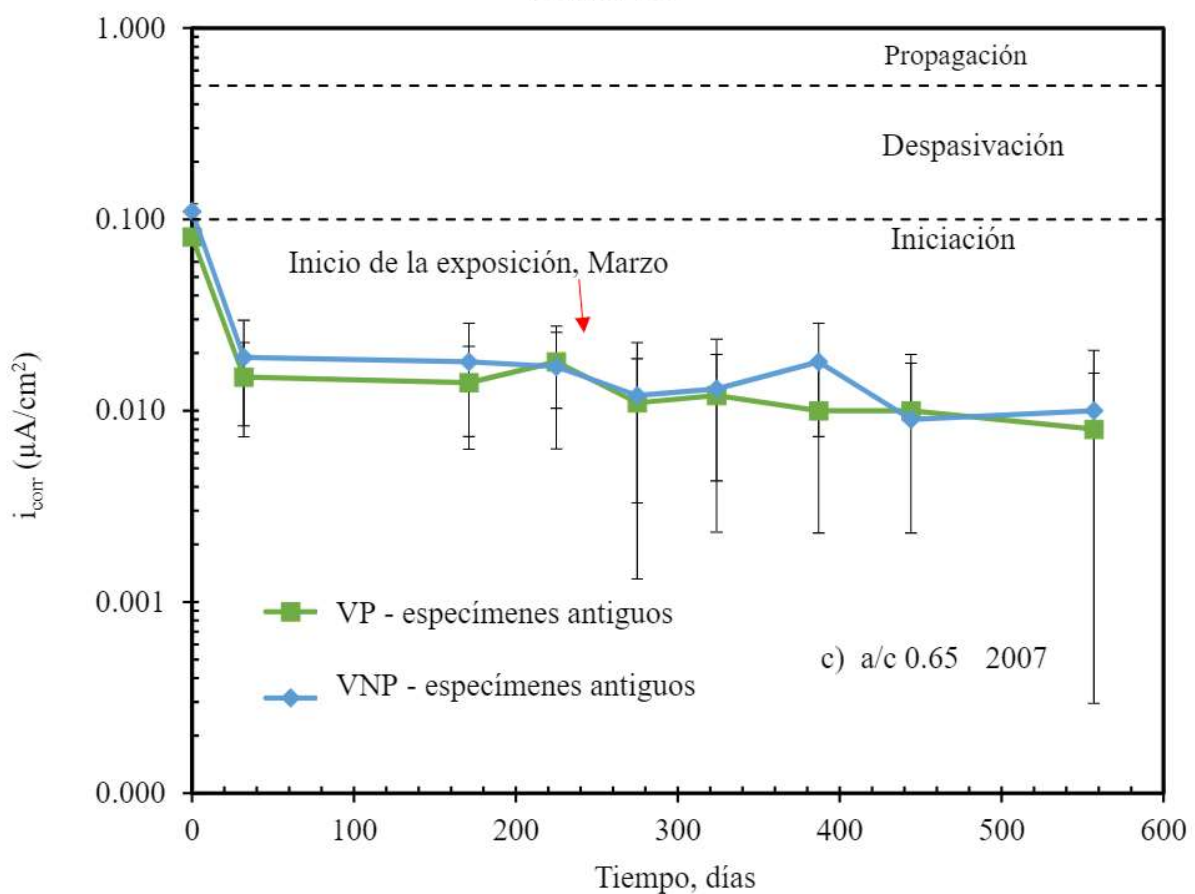
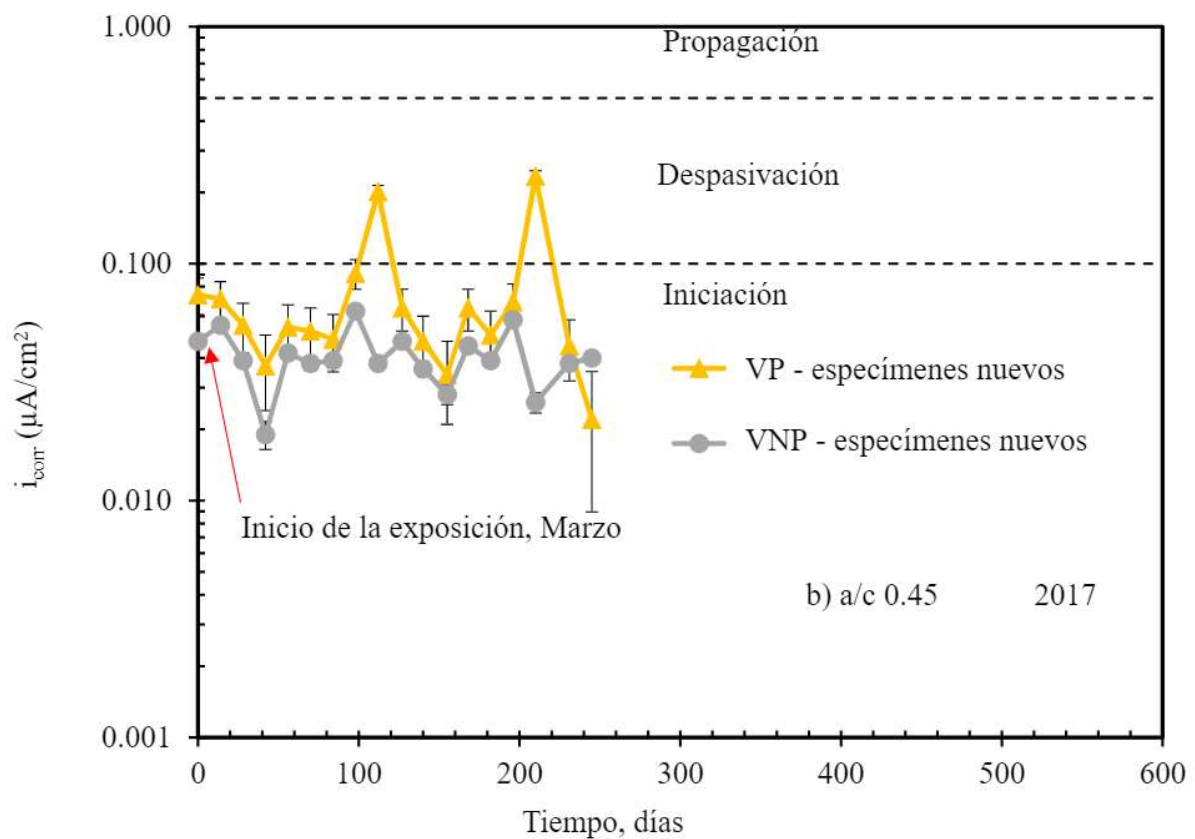
### 3.2 Efectos de la periodicidad en las mediciones electroquímicas en el procesamiento de datos

Una preocupación obvia cuando se toman mediciones electroquímicas frecuentes en el acero de refuerzo pasivo en concreto es la posible polarización dañina que podría afectar el valor real de  $i_{corr}$ . En los tiempos modernos, la polarización dañina se controla, por ejemplo, midiendo el  $i_{corr}$  a través de la resistencia a la polarización lineal con velocidades de barrido del orden de centésimas de milivoltios y con polarización catódica cercana a 20 mV como máximo. Por lo tanto, y dentro de estos rangos, una mayor periodicidad de medición en las polarizaciones para medir la corrosión no es perjudicial para la barra de refuerzo estudiada, y especialmente en las pruebas de campo. Este tema general se ha abordado ampliamente, pero no hay estudios previos (Andrade & Gonzalez, 1978; Andrade et al, 1986; Clément et al, 2012; Hansson et al, 2012) que contengan información

sobre el posible efecto de la periodicidad de las mediciones para interpretar el significado del  $i_{cum}$  en condiciones naturales. La diferencia más obvia entre los estudios de laboratorio y de campo es que, en condiciones de laboratorio, los intervalos de medición pueden ser minutos, mientras que en condiciones naturales los intervalos son normalmente del orden de días. El posible efecto de la periodicidad de polarización en las edades iniciales en la corrosión acumulada podría ocurrir en un entorno natural en respuesta a los picos de temperatura y humedad, lo que permitiría interpretar con mayor precisión los cambios en las tendencias observadas. Por lo tanto, determinar si la periodicidad de la medición electroquímica influye en la interpretación de la pasivación/despasivación en concreto reforzado con  $i_{cum}$  bajo un ambiente natural durante la etapa de iniciación (zona de pasivación) es, por lo tanto, muy importante técnica y económicamente. El  $i_{corr}$  confirma que la periodicidad de la medición en los especímenes más antiguos o nuevos no afectó la credibilidad de los datos, ya que ambas series de especímenes mostraron las mismas tendencias (Figura 4). Sin embargo, cuando se usa  $i_{cum}$ , la periodicidad de la medición electroquímica podría crear diferencias entre las tendencias que, si se conocen, podrían ser equivalentes a los niveles de tolerancia utilizados en pruebas destructivas como las que se usan para comparar las pérdidas electroquímicas con las pérdidas gravimétricas. (C. Andrade & Martinez, 2005). Para aproximar estas diferencias, se analizaron los datos de la Figura 4, lo que resultó en los datos de la Figura 5.







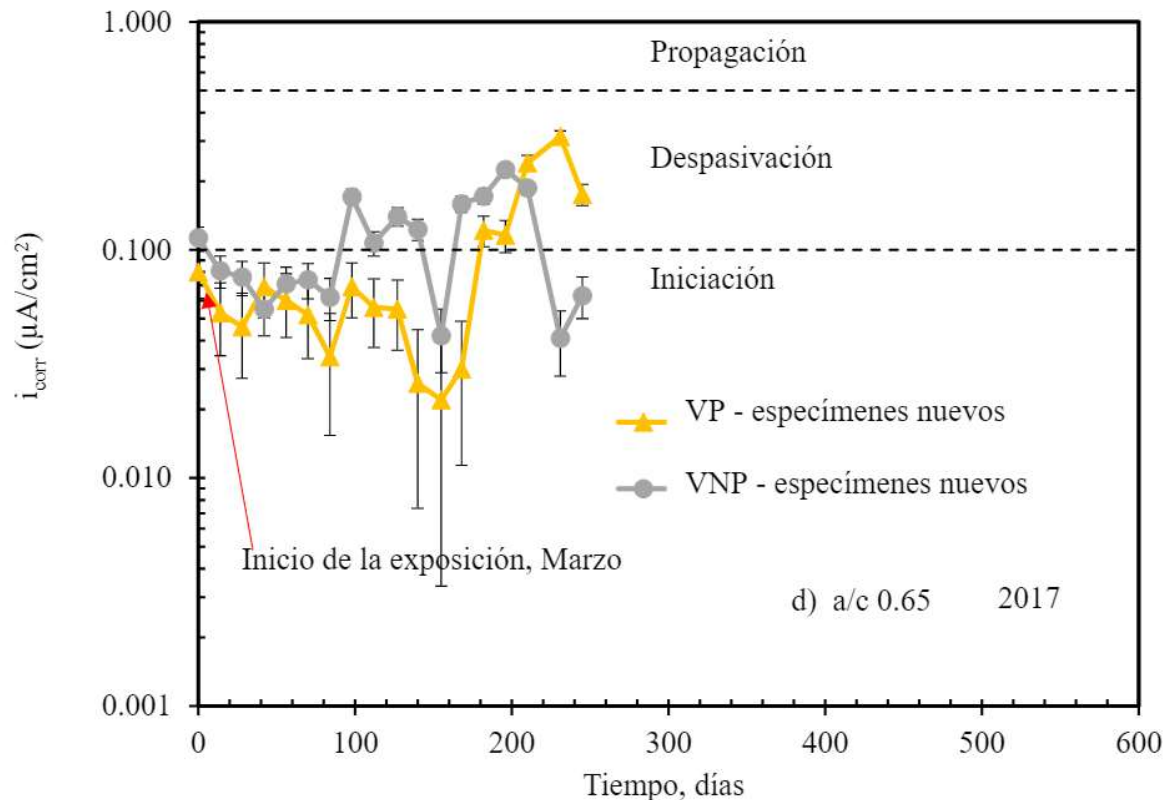


Figura 4. Velocidad de corrosión instantánea vs. tiempo: a) a/c 0.45, marzo 2007; b) a/c 0.45, marzo 2017; c) a/c 0.65, marzo 2007; d) a/c 0.65, marzo 2017.

La Figura 5 muestra una relación entre dieciséis mediciones de marzo de 2017 y cuatro mediciones de marzo de 2007 que corresponden, en ambos casos, a un período de exposición de 211 días justo después del comienzo de la exposición al medio ambiente. Esta relación  $16/4 = 4/1$  fue tomada como nuestra referencia para discutir el efecto de la periodicidad de la medición en la interpretación de  $i_{cum}$ . El término  $i_{cum}$  se puede definir como la suma de las velocidades de corrosión anteriores en cada período específico (Castro-Borges et al., 2013), como se describe en la ecuación (2):

$$i_{cum} = \frac{(t_f - t_i) * (i_{corrf} + i_{corri})}{2} + i_{cumi} \quad (2)$$

Where:

$t_f$  = Día final del período considerado

$t_i$  = Día inicial del período considerado

$i_{corrf}$  =  $i_{corr}$  final del período considerado

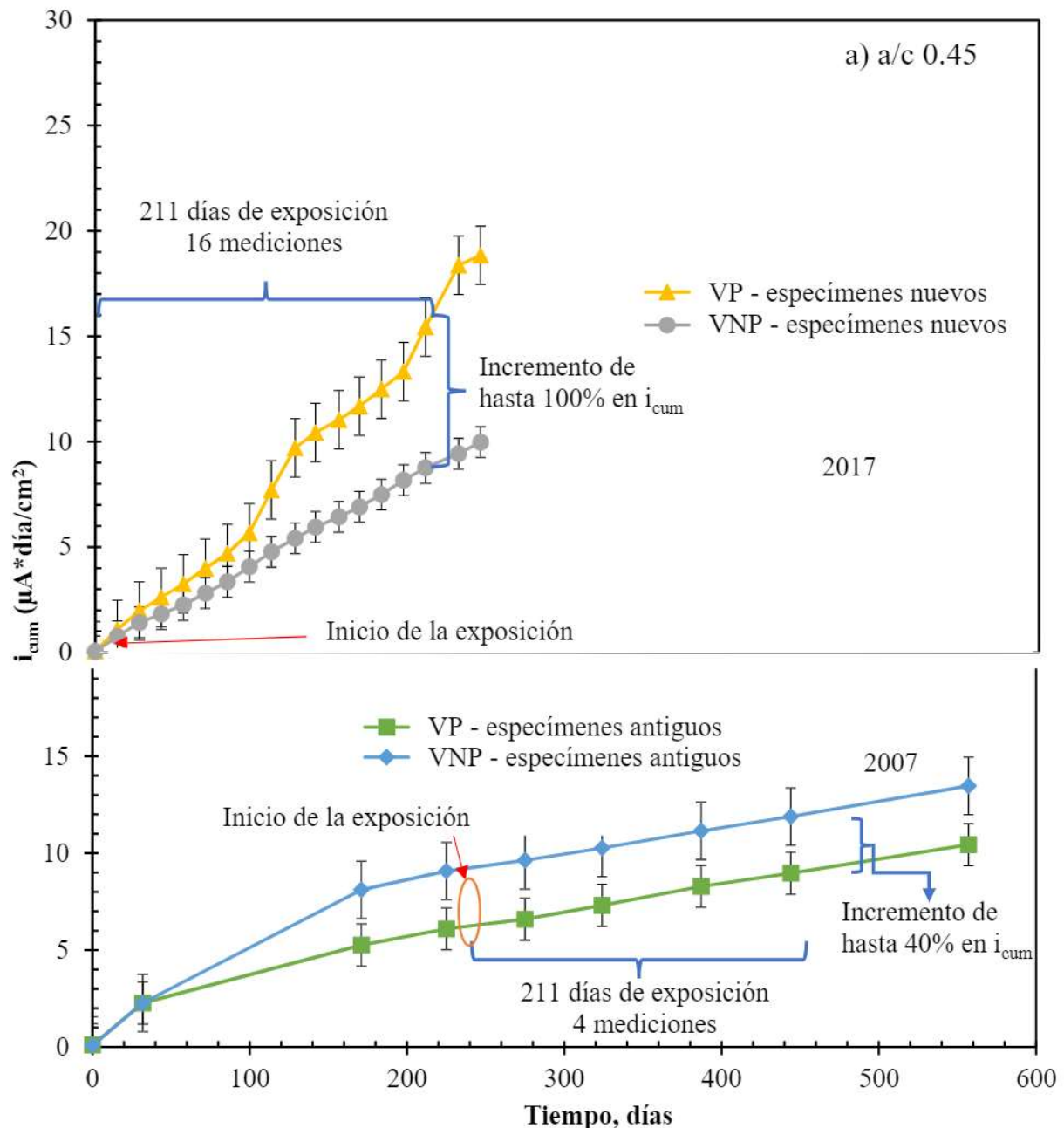
$i_{corri}$  =  $i_{corr}$  inicial del período considerado

$i_{cumi}$  = Velocidad de corrosión acumulada previamente

Cuando los datos de la Figura 5 se analizaron utilizando una relación de periodicidad de medición electroquímica 4/1, la diferencia entre VP y VNP fue de hasta el 100% en el valor de  $i_{cum}$  en especímenes que no tuvieron tiempo para consolidar su pasivación correctamente (2017). Además, las tendencias entre VP y VNP se invirtieron al considerar la calidad del concreto (a/c 0.45 o 0.65). Esto coincide y podría compararse con la tolerancia debido a los errores que se atribuyen a la recopilación de datos cuando las pérdidas electroquímicas se comparan con las pérdidas gravimétricas (Andrade & Martinez, 2005). Sin embargo, esto no sucedió con aquellos (2007) que se almacenaron durante 233 días y luego se expusieron durante 211 días, y eso influyó en el  $i_{cum}$



entre VP y VNP de hasta 40%. En este caso, podría significar la posibilidad de tener una tolerancia más aguda si se comparan las pérdidas electroquímicas con las gravimétricas. Los valores de 100% y 40% probablemente signifiquen una diferencia característica entre especímenes con pasivación no consolidada o consolidada justo antes del comienzo de la etapa de despasivación para la relación 4/1 de periodicidad de medición. Las limitaciones experimentales y de recopilación de datos podrían influir ligeramente en los resultados, por lo que no necesariamente se aplican en condiciones diferentes a las informadas en este trabajo. En forma equivalente, si se encontraran relaciones de medición  $> 4/1$  y proporcionaran diferencias numéricas aún mayores en la corrosión acumulada, se pondría en duda la credibilidad de los datos en edades iniciales (zona de pasivación). Esto se ve respaldado por el hecho de que los valores de  $i_{corr}$  (Figura 4) comienzan a mostrar valores límite cercanos a  $0.1 \mu A/cm^2$ , el 100% de tolerancia al comparar pérdidas electroquímicas contra gravimétricas, y la posición invertida de las tendencias de VP y VNP en la Figura 5.



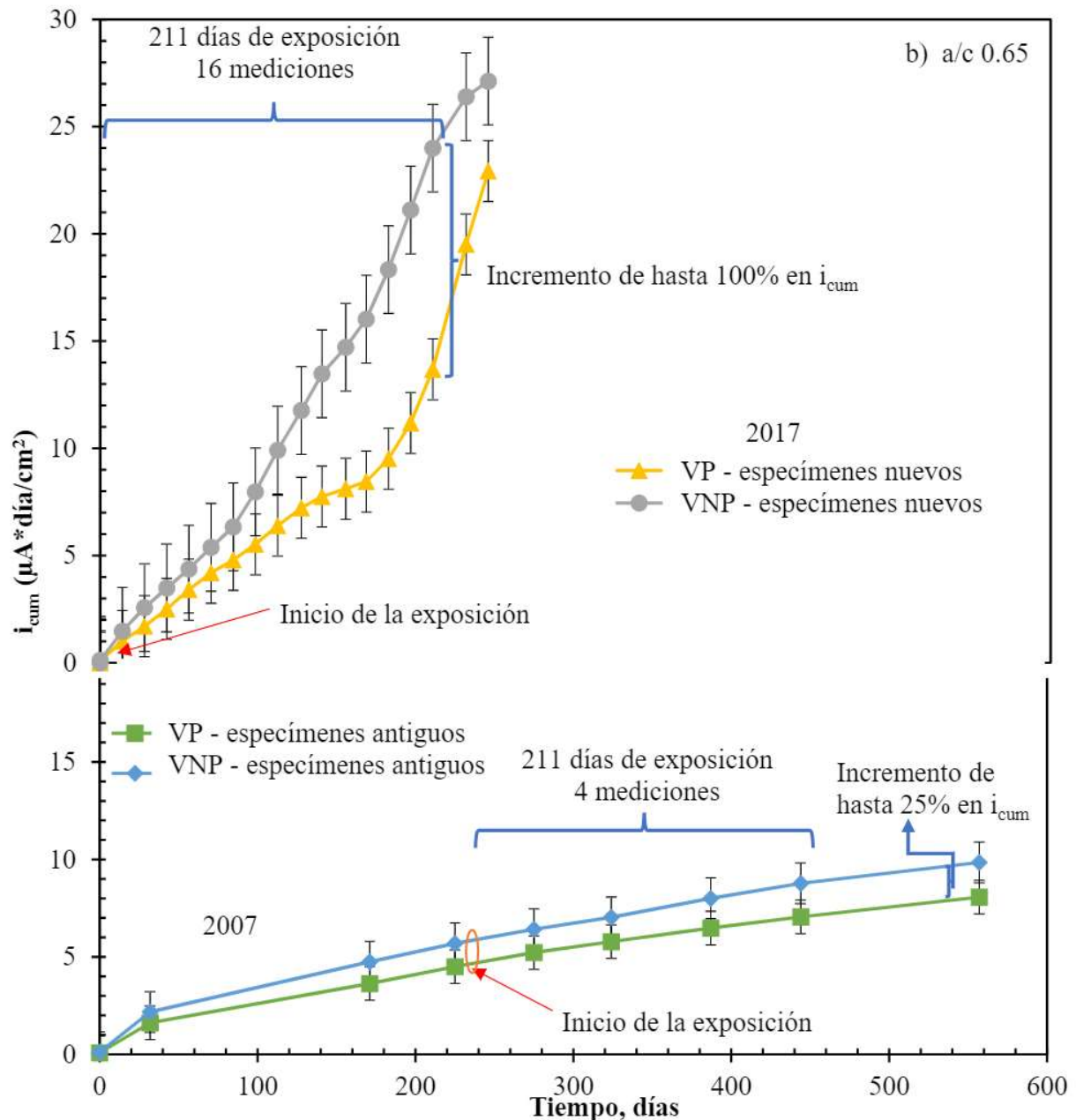


Figura 5. Velocidad de corrosión acumulada vs. tiempo: a) a/c 0.45; b) a/c 0.65.

### 3.3 Margen de incertidumbre en corrosión acumulada

En la Figura 6, el  $i_{cum}$  de los especímenes de 2007 corresponde al momento justo antes de la exposición al ambiente marino tropical. Estos especímenes estuvieron bajo condiciones semi-controladas (almacenamiento en un laboratorio, al abrigo de la lluvia y el sol y sin control de la humedad relativa y la temperatura) durante todo el período. No se observaron variaciones significativas en una periodicidad de medición de aproximadamente tres meses (Figura 4). Teniendo en cuenta que eran electroquímicamente estables en la zona de pasivación, la corrosión acumulada inmediatamente antes de la exposición al entorno natural difería entre las superficies (VP y VNP), de  $1 \mu A \cdot \text{dia} / \text{cm}^2$  para a/c 0.65 a  $5 \mu A \cdot \text{dia} / \text{cm}^2$  para a/c 0.45. Ahmad (2003) menciona que cuanto menor es el contenido de cemento, menor es la consistencia plástica en la mezcla, lo que hace que la pasivación del acero no ocurra de manera uniforme, lo que resulta en la



despasivación; por lo tanto, los resultados encontrados podrían representar el margen de incertidumbre al interpretar  $i_{cum}$  en edades iniciales (zona de pasivación) y estas diferencias ( $1 \mu A \cdot día/cm^2$  para a/c 0.65 a  $5 \mu A \cdot día/cm^2$  para a/c 0.45) ser consideradas como características de los materiales utilizados.

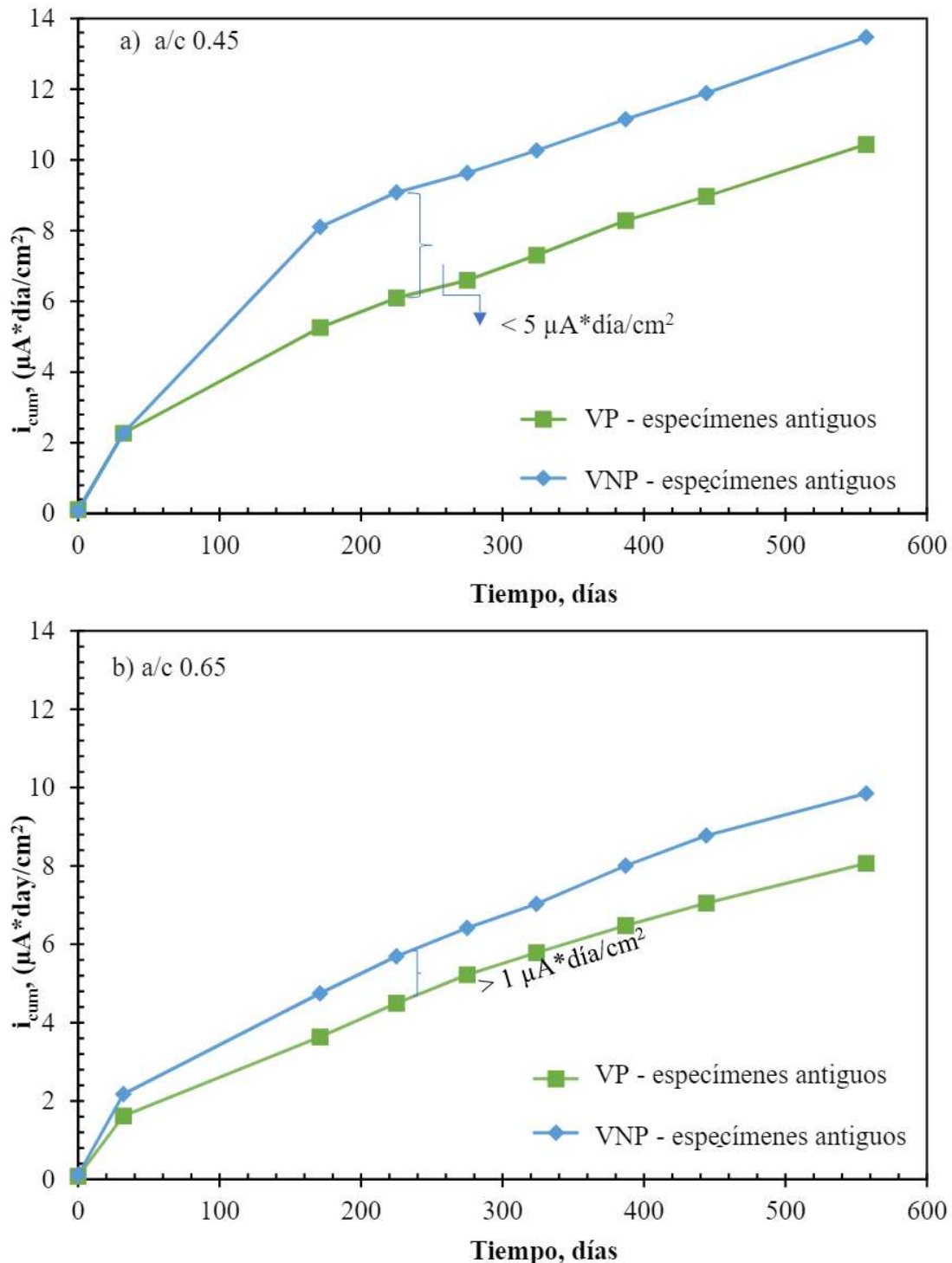


Figura 6. Incertidumbre en la velocidad de corrosión vs. tiempo: a) a/c 0.45; b) a/c 0.65.

#### 4. CONCLUSIONES

Los resultados informados se aplican a las condiciones específicas de este estudio. Por lo tanto, se pueden extrapolar tomando las precauciones adecuadas para otras situaciones. En los datos actuales, los parámetros considerados para la consolidación de la calidad de la pasivación en las edades iniciales (es decir, curado, almacenamiento y variables ambientales) afectan la tendencia a la despasivación independientemente de las variables dependientes (relación a/c y orientación). Esto puede afectar la vida útil planificada.

Como se esperaba, la polarización producida por la periodicidad de la medición electroquímica (días) en un ambiente marino tropical no influyó en la pasivación/despasivación del concreto reforzado durante la etapa de iniciación (zona de pasivación).

Cuando la periodicidad de la medición electroquímica se calculó en una proporción de 4/1, se descubrió que podía influir numéricamente en el valor de corrosión acumulada hasta en un 100%. Esto es equivalente a la tolerancia utilizada en pruebas destructivas que comparan pérdidas electroquímicas con pérdidas gravimétricas.

Aunque se considera un método en gran medida cualitativo,  $i_{cum}$  permite la detección de cambios en el comportamiento electroquímico del concreto reforzado en la etapa de iniciación (pasivación). Desde una perspectiva cuantitativa, el tipo de almacenamiento después del curado y antes de la exposición al medio ambiente, incluso en la etapa de iniciación (antes de la despasivación), tuvo una influencia que difirió de  $1 \mu A \cdot día/cm^2$  para a/c 0.65 y  $5 \mu A \cdot día/cm^2$  para a/c 0.45 en  $i_{cum}$ . Esto es equivalente al margen de incertidumbre al interpretar la corrosión acumulada en las calidades de concreto estudiadas.

#### 5. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a CINVESTAV-IPN Unidad Mérida y CONACyT por su apoyo parcial. Uno de los autores, Jorge Briceño-Mena, desea agradecer al CONACyT por su beca para sus estudios de doctorado.

#### 6. REFERENCIAS

- American Concrete Institute Committee (ACI) (2002). *ACI 211-91. Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete*. American Concrete Institute Committee 211, (Reapproved), 1–38.
- Alonso, C., Andrade, C., Castellote, M., Castro, P. (2000). *Chloride threshold values to depassivate reinforcing bars embedded in a standardized OPC mortar*. Cement and Concrete Research, 30(7), 1047–1055. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00265-9](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00265-9)
- Andrade, C., Alonso, C. (1996). *Corrosion rate monitoring in the laboratory and on-site*. Construction and Building Materials, 10(5), 315–328. [https://doi.org/10.1016/0950-0618\(95\)00044-5](https://doi.org/10.1016/0950-0618(95)00044-5)
- Andrade, C., Gonzalez, J. A. (1978). *Quantitative measurements of corrosion rate of reinforcing steels embedded in concrete using polarization resistance measurements*. Materials and Corrosion, 29(8), 515–519. <https://doi.org/10.1002/maco.19780290804>
- Andrade, C., Martinez, I. (2005). *Calibration by gravimetric losses of electrochemical corrosion rate measurement using modulated confinement of the current*. Materials and Structures, 38(283), 833–841. <https://doi.org/10.1617/14297>



- Andrade, C., Merino, P., Nóvoa, X. R. R., Pérez, M. C. C., & Soler, L. (1995). *Passivation of Reinforcing Steel in Concrete*. Materials Science Forum, 192–194, 891–898. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.192-194.891>
- Andrade, C., Castelo, V., Alonso, C., González, J. A. (1986). *The determination of the corrosion rate of steel embedded in concrete by the polarization resistance and AC impedance methods*. Corrosion Science, 26, 961–970. [https://doi.org/10.1016/0010-938X\(86\)90086-7](https://doi.org/10.1016/0010-938X(86)90086-7)
- Ahmad, A., Kumar, A. (2013). *Chloride ion migration/diffusion through concrete and test methods*. International Journal on Advanced Scientific and Technical Research, 6(3), 151–180.
- Ahmad, S. (2003). *Reinforcement corrosion in concrete structures, its monitoring and service life prediction - A review*. Cement and Concrete Composites, 25(4-5 SPEC), 459–471. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(02\)00086-0](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(02)00086-0)
- Berke, N. S., Escalante, E., Nmai, C. K., & Whiting, D. (1996). *Techniques to Assess the Corrosion Activity of Steel Reinforced Concrete Structures - ASTM STP 1276*. American Society for Testing and Materials.
- Castro-Borges, P., Balancán-Zapata, M., López-González, A. (2013). *Analysis of tools to evaluate chloride threshold for corrosion onset of reinforced concrete in tropical marine environment of Yucatán, México*. Journal of Chemistry, 2013, 1–9. <https://doi.org/10.1155/2013/208619>
- Castro-Borges, P., Balancán-Zapata, M., Zozaya-Ortiz, A. (2017). *Electrochemical meaning of cumulative corrosion rate for reinforced concrete in a tropical natural marine environment*. Advances in Materials Science and Engineering, Article ID 6973605. <https://doi.org/10.1155/2017/6973605>
- Clément, A., Laurens, S., Arliguie, G., & Deby, F. (2012). *Numerical study of the linear polarisation resistance technique applied to reinforced concrete for corrosion assessment*. European Journal of Environmental and Civil Engineering, (3–4), 1–17. <https://doi.org/10.1080/19648189.2012.668012>
- Ghods, P., Isgor, O. B., McRae, G., Miller, T. (2009). *The effect of concrete pore solution composition on the quality of passive oxide films on black steel reinforcement*. Cement and Concrete Composites, 31(1), 2–11. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.10.003>
- Hansson, C. M., Poursaee, A., Jaffer, S. J. (2012). *Corrosion of Reinforcing Bars in Concrete*. The Masterbuilder, 15(3). <https://doi.org/10.1179/000705980798275535>
- Huet, B., L'Hostis, V., Miserque, F., Idrissi, H. (2005). *Electrochemical behavior of mild steel in concrete: Influence of pH and carbonate content of concrete pore solution*. Electrochimica Acta, 51(1), 172–180. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2005.04.014>
- Jiang, J. Y., Wang, D., Chu, H. Y., Ma, H., Liu, Y., Gao, Y., Shi, J., Sun, W. (2017). *The passive film growth mechanism of new corrosion-resistant steel rebar in simulated concrete pore solution: Nanometer structure and electrochemical study*. Materials, 10(4). <https://doi.org/10.3390/ma10040412>
- Lopez, W., & Gonzalez, J. A. (1993). *Influence of the degree of pore saturation on the resistivity of concrete and the corrosion rate of steel reinforcement*. Cement and Concrete Research, 23(2), 368–376. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(93\)90102-F](https://doi.org/10.1016/0008-8846(93)90102-F)
- Melchers, R. E., Li, C. Q. (2006). *Phenomenological modeling of reinforcement corrosion in marine environments*. ACI Materials Journal, 103(1), 25–32. Retrieved from <http://0-proquest.umi.com.library.newcastle.edu.au:80/pqdweb?did=1090660671&Fmt=7&clientId=29744&RQT=309&VName=PQD>
- ONNCCE (2014). *NMX-C-414-ONNCCE. Industria de la Construcción - Cementos Hidráulicos - Especificaciones y métodos de prueba*. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S. C.
- ONNCCE (2015). *NMX-C-501-ONNCCE. Industria de la construcción-Durabilidad de estructuras de concreto reforzado-Medición de velocidad de corrosión en campo-Especificaciones*

y método de ensayo. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S. C.

ONNCCE (2017). *NMX-C-530-ONNCCE. Industria de la construcción – Durabilidad – Norma general de durabilidad de estructuras de concreto reforzado – Criterios y Especificaciones*. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S. C.

Page, C. L. (2009). *Initiation of chloride-induced corrosion of steel in concrete: Role of the interfacial zone*. *Materials and Corrosion*, 60(8), 586–592. <https://doi.org/10.1002/maco.200905278>

Pech-Canul, M. A., Castro, P. (2002). Corrosion measurements of steel reinforcement in concrete exposed to a tropical marine atmosphere. *Cement and Concrete Research*, 32(3), 491–498. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00713-X](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00713-X)

Pedrosa, F., Andrade, C. (2010). *Study of corrosion rate variability in indoor and outdoor specimens*. In Carmen Andrade & J. Gulikers (Eds.), *Advances in Modeling Concrete Service Life: Proceedings of 4th International RILEM* (pp. 33–42). Madrid: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-2703-8>

Poursaei, A., Hansson, C. M. (2007). *Reinforcing steel passivation in mortar and pore solution*. *Cement and Concrete Research*, 37(7), 1127–1133. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.04.005>

Rebolledo, N., Andrade, C. (2010). *From corrosion rate to accumulated corrosion depth or loss in cross section of reinforcements*. In Carmen Andrade & J. Gulikers (Eds.), *Advances in Modeling Concrete Service Life: Proceedings of 4th International RILEM* (Vol. 3, pp. 43–51). Madrid: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-2703-8>

Troconis, O., Romero, A., Andrade, C., Helene, P., Díaz, I. (1998). *Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado* (2nd ed.). Red Durar.