

Correlación entre ancho de grietas y velocidad de corrosión en la durabilidad de concreto reforzado en un ambiente marino tropical altamente agresivo

O. Troconis de Rincón^{1*} , V. Milano¹ , A. A. Torres-Acosta² , Y. Hernández-López¹ 

*Autor de Contacto: oladistdr@gmail.com

DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i3.321>

Recepción: 12/06/2018 | Aceptación: 02/08/2018 | Publicación: 31/08/2018

RESUMEN

Esta investigación tiene como objetivo el evaluar la correlación entre ancho de grieta producido por corrosión y la velocidad de corrosión aparente (i_{CORR}) de especímenes de concreto reforzado, expuestos por más de 6 años a un ambiente marino tropical en la estación La Voz, Venezuela. Seis especímenes del Proyecto DURACON (prismas de 15x15x60 cm, y concreto con relación a/c de 0.65) fueron monitoreados en este trabajo; los cuales tienen 6 varillas de refuerzo a diferentes profundidades (dos a 15, 20 y 30 mm), para las pruebas electroquímicas. Se estableció una correlación empírica entre la velocidad de propagación de la grieta superficial e i_{CORR} , que podría ayudar a estimar el valor de i_{CORR} , si se dispone de valores promedio de ancho máximo de grieta del elemento corroyéndose durante un periodo de monitoreo por lo menos de un año.

Palabras clave: Concreto reforzado; ambiente marino; velocidad de corrosión; ancho de grieta.

Citar como: O. Troconis de Rincón, V. Milano, A. A. Torres-Acosta, Y. Hernández-López (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), pp. 317-332, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i3.321>

¹ Centro de Estudios de Corrosión (CEC), Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia, Maracaibo, Venezuela.

² Universidad Marista de Querétaro (UMQ), Facultad de Ingeniería, Laboratorio de Materiales de Construcción; Instituto Mexicano del Transporte (IMT), Coordinación de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural, Sanfandila, Querétaro, 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, 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 segundo número del año 2019 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del primer número del año 2019.

Cracks width-corrosion rate correlation on the durability of reinforced concrete in a very high aggressiveness tropical marine environment

ABSTRACT

The aim of this investigation was evaluate the correlation between crack width and apparent corrosion rate in reinforced concrete specimens exposed for more than six years to a tropical marine environment, at the natural test site La Voz, Venezuela. Six specimens from DURACON Project (prismatic 15x15x60 cm, with 0.65 w/c ratio) were monitored; each specimen having six reinforcing steel bars placed at three different depths (two each at 15, 20, and 30 mm) for electrochemical tests (corrosion potential and corrosion rate). An empirical correlation between surface crack propagation rate and i_{CORR} was established, which may help i_{CORR} estimation indirectly if values of maximum surface crack widths due to reinforcement corrosion are obtained in at least one year period of monitoring.

Keywords: reinforced concrete; marine environment; corrosion rate; cracks width.

Correlação entre a abertura da fissura e a taxa de corrosão na durabilidade do concreto armado em um ambiente marinho tropical altamente agressivo

RESUMO

O objetivo desta investigação foi avaliar a correlação entre a abertura de fissura e taxa de corrosão aparente em amostras de concreto armado expostas há mais de seis anos a um ambiente marinho tropical, num local de ensaio natural em La Voz, Venezuela. Seis amostras do Projeto DURACON (15x15x60 cm prismáticos, com relação 0,65 a/c) foram monitoradas; cada amostra possui seis barras de aço colocadas em três cobrimentos diferentes (duas de 15, 20 e 30 mm cada) para ensaios eletroquímicos (potencial de corrosão e taxa de corrosão). Uma correlação empírica entre taxa de propagação de fissuras superficiais e i_{CORR} foi estabelecida, o que pode ajudar a estimar a i_{CORR} indiretamente se valores de abertura máxima de fissuras superficiais devido à corrosão de armadura forem obtidos em pelo menos um ano de monitoramento.

Palavras-chave: concreto armado; ambiente marinho; velocidade de corrosão; abertura de fissura.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos 20 años, el término "durabilidad" se ha estado escuchando con más frecuencia. Países industrializados como Estados Unidos, algunos de Europa (España, Francia, Reino Unido) y Japón, han tomado la durabilidad como un tema de gran importancia, invirtiendo sumas millonarias en estudio e investigación en esta área. El deterioro de las estructuras por corrosión de la armadura ha aumentado siendo consecuencia el agrietamiento del recubrimiento de concreto. Muchas investigaciones realizadas se basan en el estudio de la durabilidad durante la vida útil de dichas estructuras pero en realidad muy pocas son las que se han enfocado hacia la predicción de durabilidad del concreto armado durante su vida residual.

Existen varios estudios (Tachibana, et.al., 1990; Huang and Yang, 1997; Rodriguez et.al., 1997; Almusallam, et.al., (1997); Cabrera, 1996) donde, con corrosión acelerada mediante la aplicación de una corriente anódica a la armadura, se evaluó la disminución de la resistencia a la compresión por este efecto; así como la pérdida metálica gravimétrica y los valores ancho-fisura (Almusallam, 1997; Mangat and Elgarf, 1999; Torres-Acosta, 1999), encontrando correlaciones sobre el particular.

Se han efectuado varias investigaciones relacionadas con este tema en condiciones de corrosión natural (Torres-Acosta y Martínez-Madrid, 2003; Torres-Acosta and Castro-Borges, 2013;

Cabrera-Madrid et al, 2014), reportando resultados acerca de la degradación de la vida residual. En algunos utilizaron losas de concreto armado (a/c de 0,42, contaminadas con cloruros durante la mezcla para acelerarla corrosión del refuerzo), sin aplicar corriente anódica (Torres-Acosta y Martínez-Madrid, 2003). Al final de la evaluación, midieron la posición, anchos y longitudes de grietas que serían correlacionadas con la pérdida de sección de la barra. Basados en sus resultados experimentales establecieron relaciones empíricas entre la pérdida de capacidad de carga y grado de pérdida de radio promedio de la barra por corrosión (x_{PROM}), dividido por el radio original de la barra (r_0); con lo cual se estimó que 10% de pérdida de radio podría producir una pérdida de resistencia en un 50% de los elementos de concreto reforzado. También desarrollaron una relación empírica entre ancho de grieta, AG, y x_{PROM}/r_0 con la que aparentemente cuando la tasa de corrosión es pequeña de 12-60 $\mu\text{m}/\text{año}$, aparecen y evolucionan en longitud y amplitud más rápidamente que en ensayos de corrosión acelerada, y una última relación empírica a la que llegan es la que relaciona x_{prom} con la máxima profundidad de picadura (PIT_{MAX}), donde se observó que el valor de picadura máxima está en el orden de 7 veces el valor estimado de x_{PROM} (Torres-Acosta and Martínez-Madrid, 2003).

Posteriormente, en el 2003, Vidal et. al., estudiaron el ancho de grietas y la pérdida del diámetro del refuerzo por corrosión en vigas de concreto reforzados (a/c de 0,5), contaminadas con 35 g/l de NaCl; determinando que la corrosión del refuerzo obtenida se acercó más a lo que se observa en condiciones naturales (con respecto a la distribución de la corrosión, tipo de corrosión y óxidos producidos), que la obtenida por corriente impresa o adición de cloruro de calcio en el concreto. Ellos establecieron un nuevo modelo que relaciona el ancho de grietas con la pérdida de sección del acero e indican que la pérdida de sección del refuerzo parece ser independiente del diámetro de la barra y de la relación recubrimiento/diámetro, excepto cuando se evalúa en el periodo de iniciación del agrietamiento.

En el 2007, Torres-Acosta et. al., presentaron una correlación empírica entre la velocidad de corrosión del refuerzo y el ancho de grietas, utilizando vigas de concreto armado (a/c = 0,6) contaminadas con NaCl (1 % Cl/base a cemento) y sometidas a esfuerzos de flexión. Las vigas fueron rociadas en un área central de 25 cm, 3 veces por semana, con solución salina al 3,5 % p/p, con la finalidad de acelerar el proceso de corrosión de la barra de refuerzo en esta área; concluyendo que para un proceso de corrosión natural, las grietas generadas en el concreto, por la expansión de los productos de corrosión, se desarrollan más lentamente (en ancho y longitud) que aquellas generadas por corrosión acelerada. Los resultados obtenidos indican que para una pérdida de radio del refuerzo (x_{PROM}/r_0) de un 4% y un 10% debido a la corrosión de éste, se producen grietas con un ancho máximo (AMG) de 0,1 mm y 1 mm respectivamente. La tendencia obtenida en esta investigación fue similar a la obtenida en otras investigaciones con corrosión natural (Torres-Acosta and Castro-Borges, 2013; Cabrera-Madrid et al, 2014).

En el presente trabajo de investigación se presentarán los resultados obtenidos en una de las estaciones del proyecto DURACON, ubicada en un ambiente marino-costero de muy alta agresividad (Estación La Voz), donde se muestra la correlación existente entre la velocidad de corrosión (i_{CORR}) expresada como pérdida de radio promedio (x_{PROM}/r_0) de la barra de acero y ancho máximo de grietas, utilizando para ello las probetas con relación a/c 0,65.

1. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

2.1 Specimens Prismáticos

En este trabajo se utilizaron las probetas del proyecto DURACON (Troconis de Rincón et.al., 2007), instaladas en la estación de ensayo La Voz, en Venezuela; ambiente marino de muy alta

agresividad, > C5 según ISO⁽¹⁾ 9223: 2012. La Figura 1 muestra las probetas armadas, que son las evaluadas en este trabajo; constituidas por prismas de concreto ($a/c = 0,65$), de 15x15x30 cm y reforzadas con seis barras (9,5 mm en diámetro), las cuales se colocaron a diferentes profundidades (15, 20 y 30 mm), tres de ellas en la cara expuesta a los vientos preferenciales y las otras tres en la cara resguardada de los mismos. Los extremos de cada barra están recubiertos con una pintura epóxica, para eludir la corrosión por espacios confinado debida a las celdas diferenciales de oxígeno; dejando la parte central de 15 cm de longitud descubierta. La Figura 2 muestra los bancos de prueba instalados en la estación La Voz.

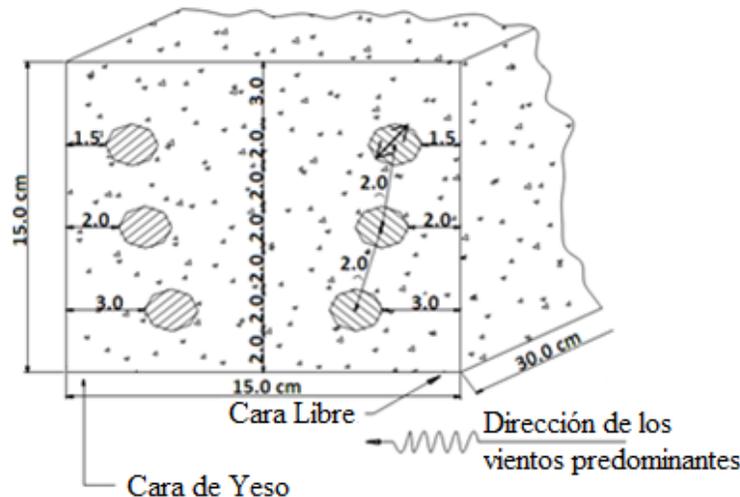


Figura 1. Diagrama esquemático de la configuración de las barras en los especímenes de concreto



Figura 2. Estación de prueba en el medio marino (La Voz)

2.2 Evaluación del medio

La Evaluación de los parámetros climáticos y ambientales (humedad relativa (HR), tiempo de humectación (TDH/τ), velocidad y dirección del viento, precipitación pluvial, temperatura, concentración de cloruros, concentración de CO_2 y concentración de compuestos de azufre), se realizó según la metodología establecida por la norma ISO 9223, estimando así la agresividad ambiental en cada una de las estaciones de ensayo. Es importante destacar que actualmente no existen normativas que permitan identificar la agresividad del ambiente para las estructuras de concreto armado, por lo cual se utilizó, en primera instancia, la norma ISO para materiales metálicos.

⁽¹⁾ISO, 1, Ch. de la Voie-Creuse, Case postale 56, CH-1211 Geneva 20, Switzerland.

2.3 Evaluación Electroquímica

Para las medidas electroquímicas se utilizó el equipo, GECORR 6 (†2) que permite medir el potencial de corrosión (E_{CORR} , referido a un electrodo de Cu/CuSO₄) y la velocidad de corrosión (i_{CORR}) de la armadura mediante la técnica de polarización lineal (Feliú et.al., 1993).

2.4 Levantamiento de Grietas

Se monitorearon las grietas formadas por corrosión del refuerzo, tanto en la cara expuesta como en la resguardada, mediante una inspección visual minuciosa utilizando una cuadrícula de acetato de 15cmx30cm (no estándar) con la que se plasmaba la longitud y ubicación de cada una de las grietas. El ancho de grietas se midió empleando una plantilla transparente, convencional utilizada para tal fin, la cual presenta impresos distintos espesores en unidades métricas; obteniéndose así un mapa general de monitoreo que muestra la longitud, ubicación y ancho de todas las grietas existentes en todas las probetas en ambas estaciones. Los datos experimentales fueron ajustados linealmente y comparados con los datos obtenidos por otros autores. Con el fin de evaluar la pérdida de sección de la barra (área bajo la curva de velocidad de corrosión vs. tiempo) y poder correlacionarla con el ancho máximo de grieta (AMG), correspondiente a cada una de las barras de las probetas evaluadas, se calculó la pérdida de masa de la armadura utilizando la fórmula de conversión de Faraday (Ecuación 1):

$$\Delta W_f = \frac{55.85}{n \times F} \left(\int I dt \right) \quad (1)$$

Dónde: ΔW_f = pérdida de masa Farádica (g); 55,85 g/mol es el peso atómico del Fe; $\int Idt = i_{corr}$ (A) dt = área bajo la curva i_{CORR} vs tiempo; n = valencia del hierro (+2) y F=Constante de Faraday = 96 500 C/mol. Este valor es utilizado después para estimar la pérdida de radio promedio por corrosión (x_{PROM}), lo cual es calculado utilizando la ecuación (2):

$$X_{avg} = \frac{\Delta W_f \times 1000}{\rho \times \pi \times D \times l} \quad (2)$$

Donde: ρ , densidad del Fe (gr/cm³); D, diámetro de la barra (mm) y l, longitud de la barra (mm). Al final de la evaluación, las barras de acero que conformaban la armadura de las probetas, fueron extraídas para determinar su pérdida de sección real.

2. RESULTADOS AND DISCUSIÓN

3.1 Evaluación del medio

La Figura 3 muestra los resultados de los parámetros meteorológicos determinados durante el tiempo de exposición. En esta se notan claramente los períodos lluviosos y de sequía, característicos de los ambientes tropicales. El cuarto año de evaluación (2006) se caracterizó por una muy alta precipitación. Una causa posible de este comportamiento tan variado durante el año 2006, es que estuvo caracterizado por acontecimientos climáticos tales como tormentas tropicales cerca de las costas de la Península de Paraguaná, y por consiguiente de la isla de Aruba.

En relación a la temperatura, ésta varía (promedio mensual), en apenas 3°C durante todo el periodo de evaluación. Los mínimos se ubican en 26,7 °C, como es el caso del mes de marzo de 2003 y en febrero del 2009, mientras que los máximos se ubican en casi 30 °C, como lo observado para el

(†2) Trade name

mes de octubre de 2004 y en septiembre del 2008. La poca variabilidad en este parámetro muestra la estabilidad climática que presenta la estación y a su vez propiamente de la región geográfica.

El valor promedio mensual más alto de humedad relativa, registrado en todo el tiempo de evaluación, se observó en agosto del 2004 el cual fue de 84%. Este coincide con el valor más alto de precipitación para ese año, como consecuencia del fenómeno meteorológico producido por el huracán Iván, el cual pasó por las Antillas menores y el Mar Caribe.

En cuanto al comportamiento de los vientos, en general se puede decir que varían en un rango entre 17 y 24 km/h, con grandes variaciones cuando se presentan cambios bruscos en el microclima, como los fenómenos que han sido explicados anteriormente donde la velocidad de los mismos se ve incrementada sustancialmente.

En la Figura 1 se muestran los valores obtenidos tanto para los agresivos presentes en esta atmósfera como el tiempo de humectación (TDH) durante todos los años de evaluación; notándose una corrosividad muy alta para los primeros tres años, según ISO 9223. Para el cuarto y quinto año, se puede notar una disminución en la corrosividad de esta atmosfera marina, posiblemente por las altas precipitaciones ocurridas en esos años; sin embargo, sigue siendo altamente corrosiva.

Tabla1. Agentes agresivos y tiempo de humectación (TDH) en la estación de ensayo La Voz

Tiempo de Evaluación (años)	Cloruros (mg m ⁻² d ⁻¹) /S		Sulfatos (mg m ⁻² d ⁻¹) /P		TDH (hy ⁻¹) /τ		ISO 9223 Clase de Corrosividad
1	683.907	S3	22.645	P1	4818	τ4	C5
2	382.561	S3	27.800	P1	4818	τ4	C5
3	128.898	S2	19.726	P1	6132	τ5	C5
4	154.159	S2	13.111	P1	3451	τ4	C4
5	165.691	S2	5.616	P0	2823	τ4	C4
6	183.682	S2	-	-	-	-	-

La corrosión por ataque de iones cloruro se favorece ya que las altas humedades relativas (HR) facilitan el transporte de este agente agresivo presente en la atmósfera, potenciado por la alta temperatura lo cual acelera la corrosión localizada de las barras.

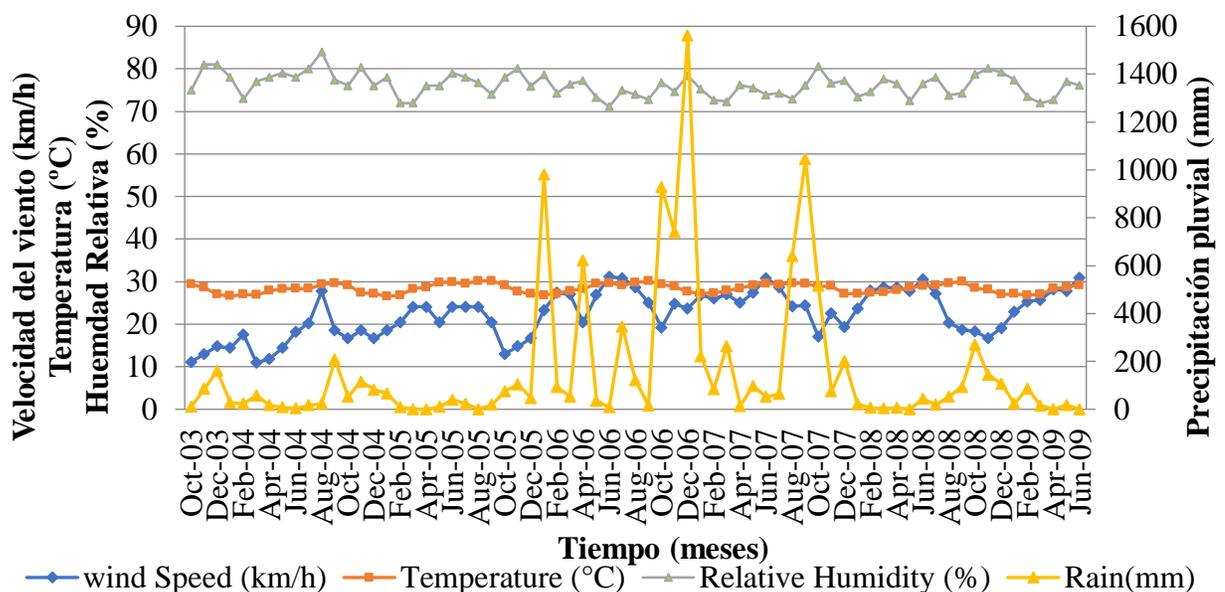


Figura 3. Comportamiento de los parámetros meteorológicos en la estación de ensayo La Voz

3.2 Parámetros Electroquímicos

Correlación entre ancho de grietas y velocidad de corrosión en la durabilidad de concreto reforzado en un ambiente marino tropical altamente agresivo

Las Figuras 4 y 5 muestran los resultados del monitoreo electroquímico: potencial de corrosión y velocidad de corrosión vs. tiempo para las barras localizadas a 15-mm y 30-mm de profundidad en el concreto, respectivamente. Estas figuras muestran claramente el momento en el cual las barras comienzan a despasivarse (E_{CORR} e i_{CORR} más negativo que -250 mV vs. Cu/CuSO₄ y mayor que 0,1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, respectivamente); coincidiendo esto con el primer cambio en la pendiente de la curva de velocidad de corrosión acumulada vs. tiempo.

Adicionalmente, en estas figuras se observa que las barras a 30 mm de profundidad permanecen pasivas por mayor tiempo que las que se encuentran a 15 mm de profundidad, pero la velocidad de propagación fue mayor para el primer grupo que para el segundo grupo. Esto se debe a que en la estación La Voz influye el efecto de la roza de los vientos que no presentan una dirección preferencial (Noreste en este caso), donde se facilita el ingreso y difusión de los iones cloruro por la cara inferior de las probetas; la cual es la más porosa por ser la cara de vaciado y quedando la barra a 30 mm como la más expuesta por esta zona, dando este comportamiento inusual.

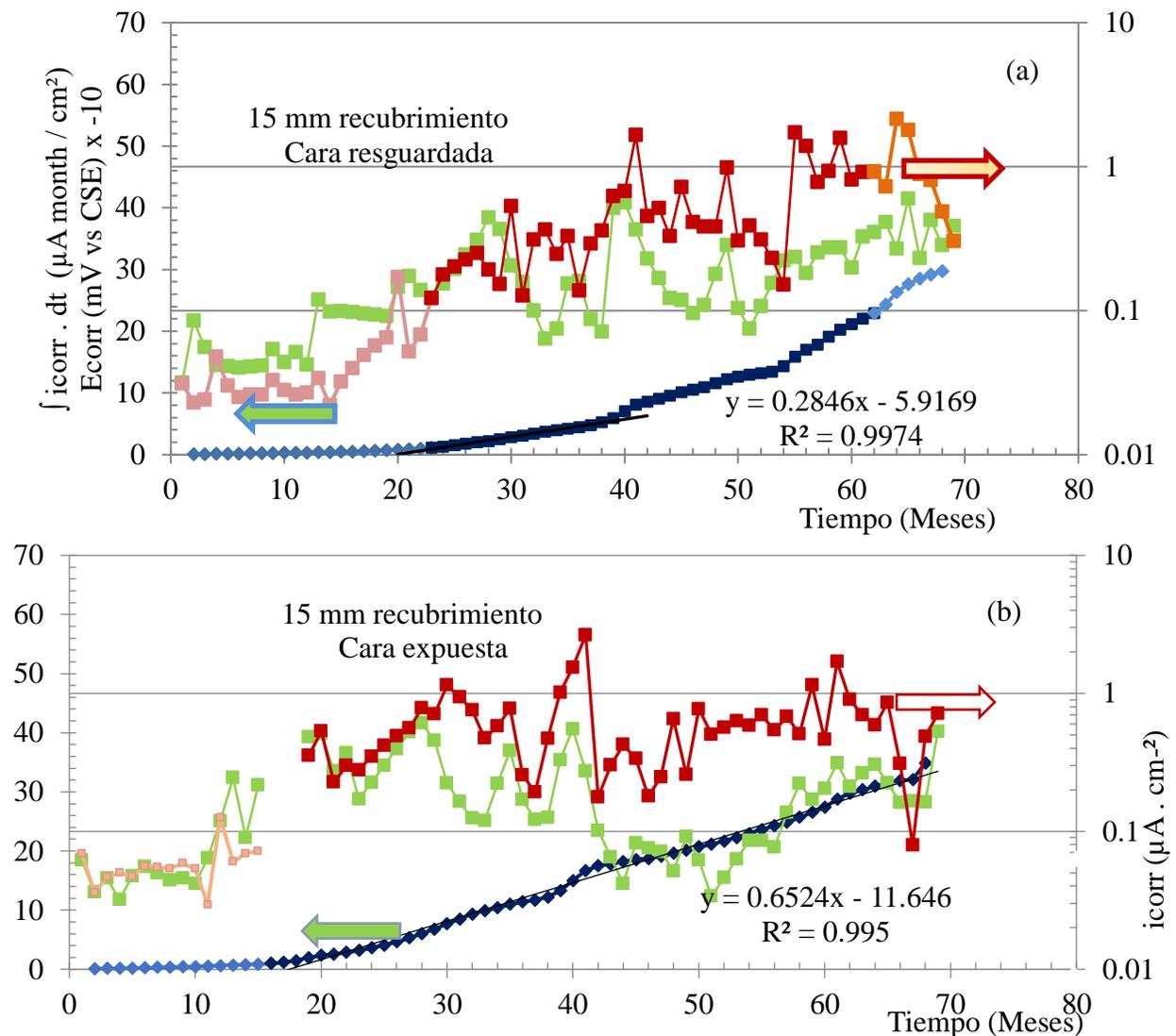


Figura 4. Monitoreo de los parámetros electroquímicos (valores de E_{CORR} ; i_{CORR} e i_{CORR} acumulada) vs. tiempo para la barra a 15-mm de profundidad en el concreto, cara resguardada (a) y cara expuesta a los vientos preferenciales (b).

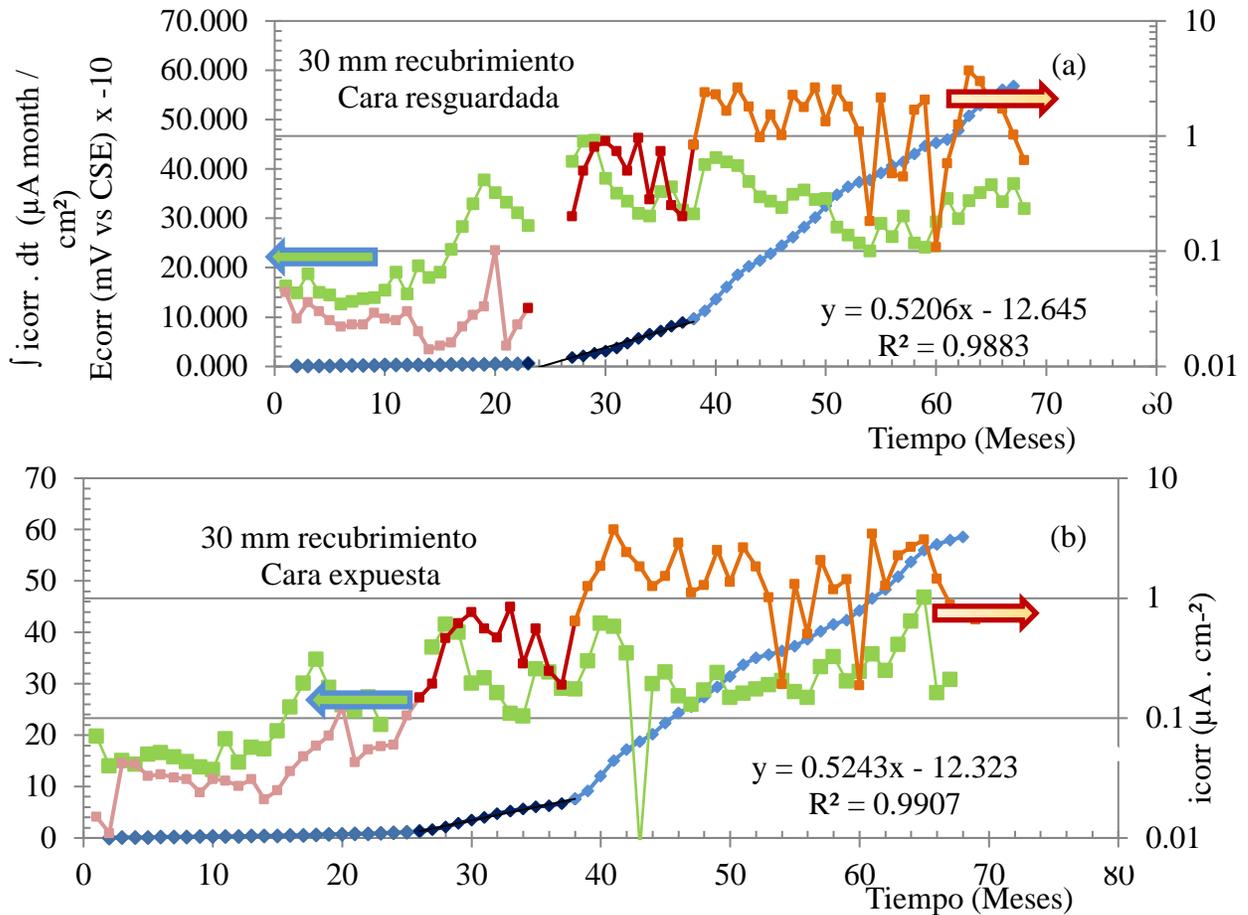


Figura 5. Monitoreo de los parámetros electroquímicos (valores de E_{CORR} ; i_{CORR} e i_{CORR} acumulada) vs. tiempo para la barra a 30-mm de profundidad en el concreto, cara resguardada (a) y cara expuesta a los vientos preferenciales (b).

3.3 Correlación del Ancho de Fisura con la Velocidad de Corrosión

La Figura 6 muestra el estado en el que se encontraba una de las tres probetas representativas, luego de un período de 6 años de exposición en la estación natural de La Voz. Esta figura también muestra una foto de la cara expuesta a los vientos preferenciales y una representación esquemática del mapa generado con las fisuras/grietas que presentaban dichas probetas.

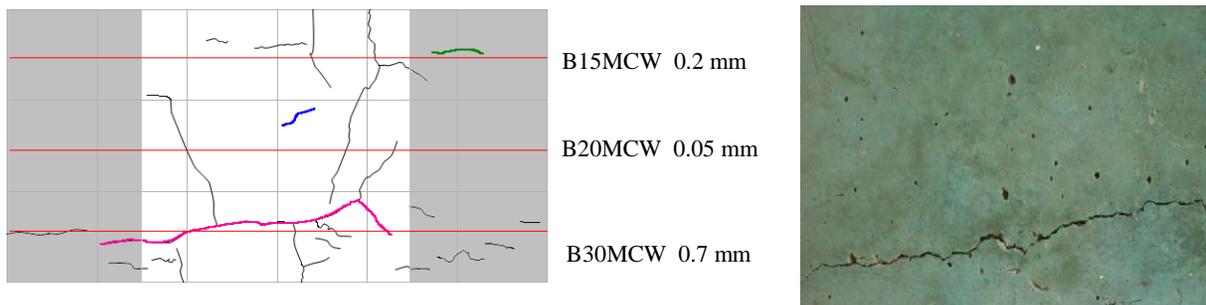


Figura 6. Especimen 6 (relación a/c 0,65, y cara resguardada de los vientos preferenciales) levantamiento de grietas en la superficie (izquierda) y evidencia fotográfica de las grietas (derecha)

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Figura 7 se observa que a medida que aumenta la pérdida de sección en las barras (estimada de la data de $\int i_{CORR} dt$ de las ecuaciones 1 y 2),

aumenta en forma directa el ancho de las grietas para la cara expuesta a los vientos preferenciales de las probetas. En cuanto al espesor de recubrimiento de la cara expuesta, se observa que para obtener un determinado ancho de grieta, se necesita menor pérdida de material por corrosión a 15 mm de profundidad que a 30 mm. Esto se debe a que en este ambiente la alta humedad relativa imperante en la zona (>80%), unido al alto contenido de iones cloruro, mantiene una humedad tal que los iones cloruro (129-684 mg/m²d) pueden difundir fácilmente en el concreto induciendo a la corrosión de la armadura.

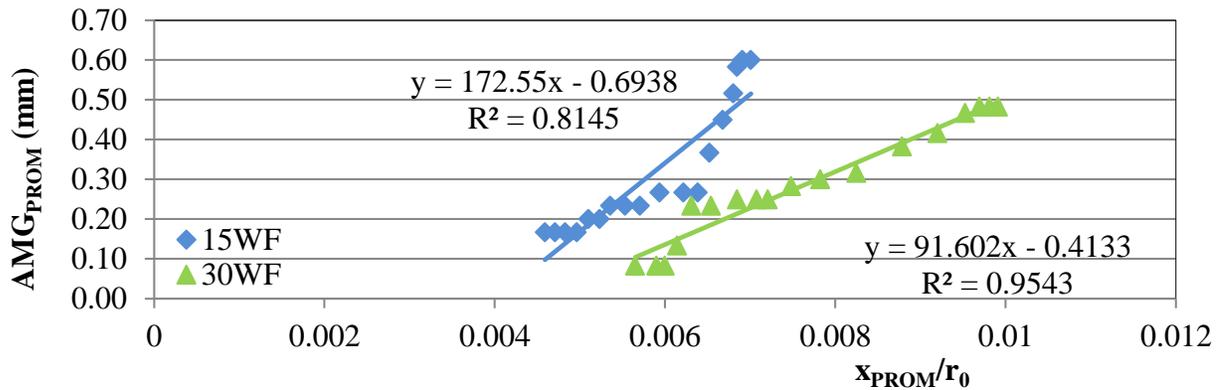


Figura 7. Promedio del Ancho máximo de grieta del concreto en relación a la pérdida de sección transversal de la barra, en la estación de ensayo La Voz, relación a/c 0.65, cara expuesta

También se puede observar que existe una relación directa entre el AMG y x_{PROM}/r_0 de la barra. Esta correlación es alta para los primeros años de exposición ($AMG < 0.3$ mm), en cambio para los AMG mayores a los 0,3 mm los datos se dispersan produciendo que la correlación de los datos disminuya. Adicionalmente, los AMG_{PROM} aumentan con poca pérdida de material por corrosión, de lo cual se deduce que los últimos datos de velocidad de corrosión medidos, con los cuales se determinó las pérdidas de sección, no son confiables; ya que cuando los anchos de grietas son grandes se producen espacios vacíos en el área que polariza el GECOR; por lo tanto, el valor de velocidad de corrosión medido no corresponde al verdadero. Por esto se hace necesario descartar las últimas mediciones de la evaluación electroquímica realizada y determinar el verdadero comportamiento de la correlación entre AMG_{PROM} e i_{CORR} utilizando las primeras mediciones. Por otra parte, en la Figura 7 no se muestra la tendencia de la barra embebida a 20 mm, ya que las fisuras se vieron afectadas por la corrosión de las barras a las otras profundidades. Por lo tanto, la relación más representativa entre el ancho máximo de grieta y la velocidad de corrosión se puede observar en la Figura 8 donde al eliminarse las últimas mediciones de la evaluación electroquímica de las dos barras se obtiene una mejor correlación de 0,9722 para la barra de 15 mm de recubrimiento de concreto; un comportamiento similar presentó la barra a 30 mm con una correlación de las mediciones de 0,9038.

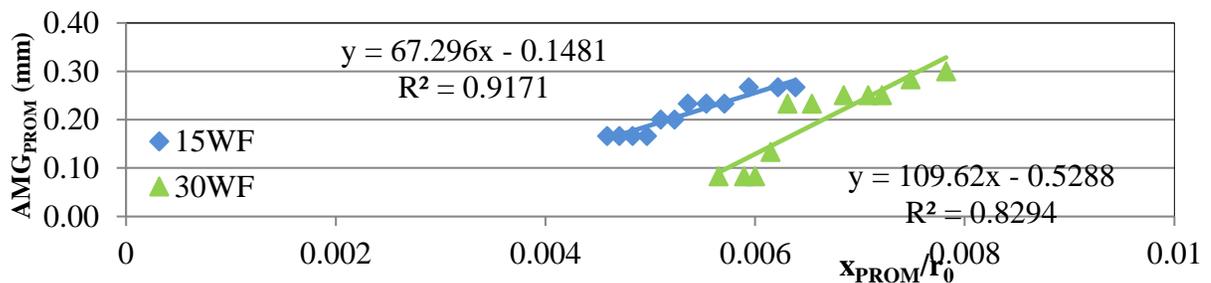


Figura 8. Comportamiento representativo (se removió la data de los últimos años) del promedio del ancho máximo de grieta del concreto en relación a la pérdida de sección transversal de la barra, en la estación de ensayo La Voz, relación a/c 0.65, cara expuesta

En la Figura 9 se muestra el levantamiento típico de grietas y una fotografía de la cara resguardada de los vientos preferenciales para una de las probetas, luego de 6 años de exposición. En esta se evidencian mayores anchos de grieta que en la cara expuesta, debido a que la cara resguardada permanece más tiempo húmeda; lo cual favorece el ingreso y difusión de los agentes agresivos característicos del medio en el que se encuentran expuestas. La cara expuesta se encuentra en contacto continuo con vientos calientes y a altas velocidades que podrían secar la humedad interna del concreto. Este comportamiento se observa también en las Figuras 4 y 5, donde las velocidades de corrosión de las barras en la cara resguardada muestran pequeños incrementos al final del período de exposición.

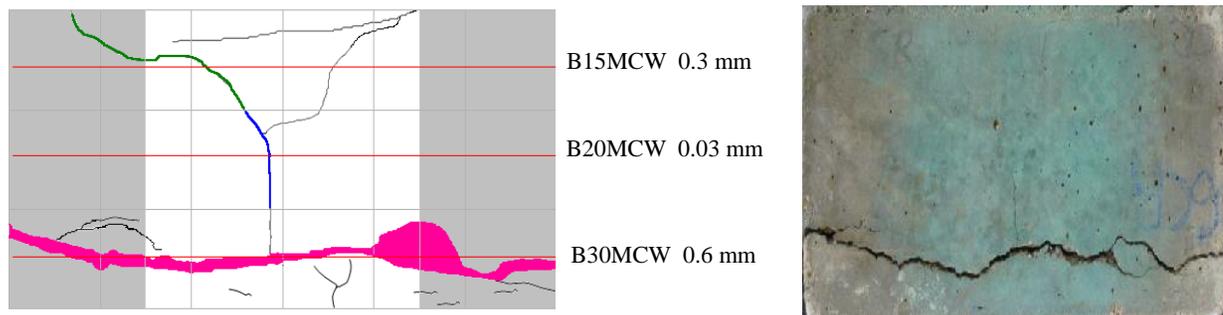


Figura 9. Izquierda, mapa general de grietas y derecha, fotos del espécimen 6, relación a/c 0,65, Cara resguardada

Al igual que en la cara expuesta, no existen buenas correlaciones entre el AMG y x_{PROM}/Γ_0 del acero de refuerzo a partir de anchos mayores de 0,5 mm; donde también se pierde la tendencia lineal para los últimos 6 puntos de la gráfica. Así, en la $\text{¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.}$ 10 se obtiene la relación más representativa entre el AMG y x_{PROM}/Γ_0 ; donde al eliminarse las últimas mediciones de la evaluación electroquímica de las dos barras se observa que mejora considerablemente la correlación ($R^2 \sim 0.9397$ y ~ 0.9843 para la barra a 30 mm y 15 mm de profundidad en el concreto, respectivamente).

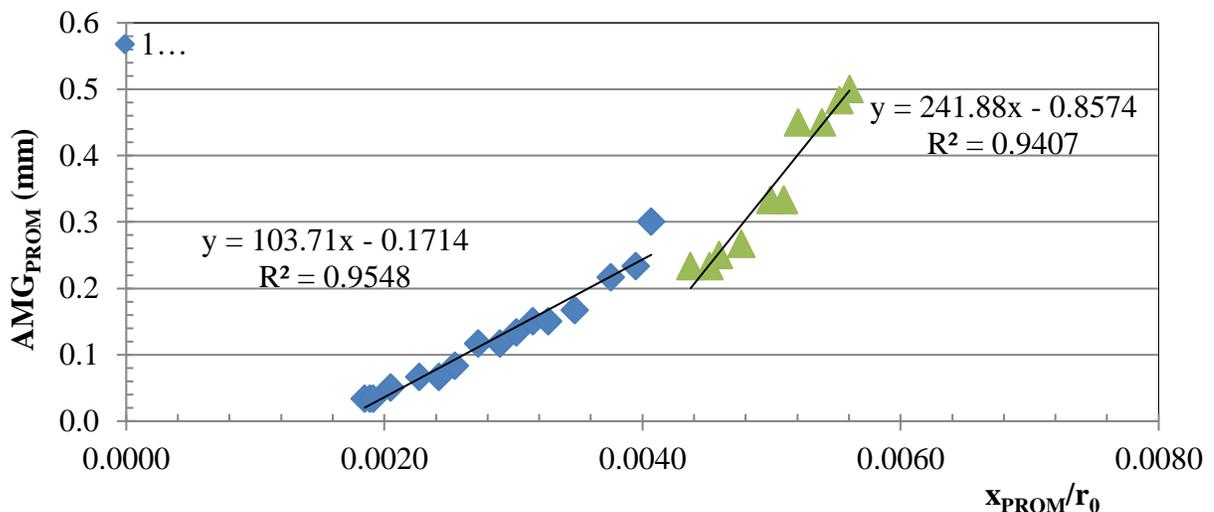


Figure 10. Comportamiento representativo (se removió la data de los últimos años) del promedio del ancho máximo de grieta del concreto en relación a la pérdida de sección transversal de la barra, en la estación de ensayo La Voz, relación a/c 0,65, cara resguardada

En la Figura 11 se muestra, a manera de comparación, una compilación de la data de AMG_{PROM} y x_{PROM}/r_0 obtenida en esta investigación en conjunto con la data de corrosión acelerada y natural de otros autores para su comparación (Torres-Acosta and Martínez-Madrid, 2003). La data de corrosión acelerada se graficó en la Figura 11 con símbolos sin color; mientras que los de la data de corrosión natural se rellenaron con negro (investigaciones previas) y azul-rosado-naranja para los datos de esta investigación. Por otra parte, en cuanto al espesor de recubrimiento de concreto, el comportamiento era inesperado; ya que existen anchos de grieta mayores para la barra situada a 30 mm de profundidad. Esto se debe (como se indicó en la sección 3.2.) a que los vientos en la estación La Voz no muestran una dirección preferencial, sino una roza de vientos permitiendo el ingreso y difusión de cloruros tanto por la cara resguardada como por la cara inferior y por ser esta la cara de vaciado, es la más porosa; dando el comportamiento inusual observado.

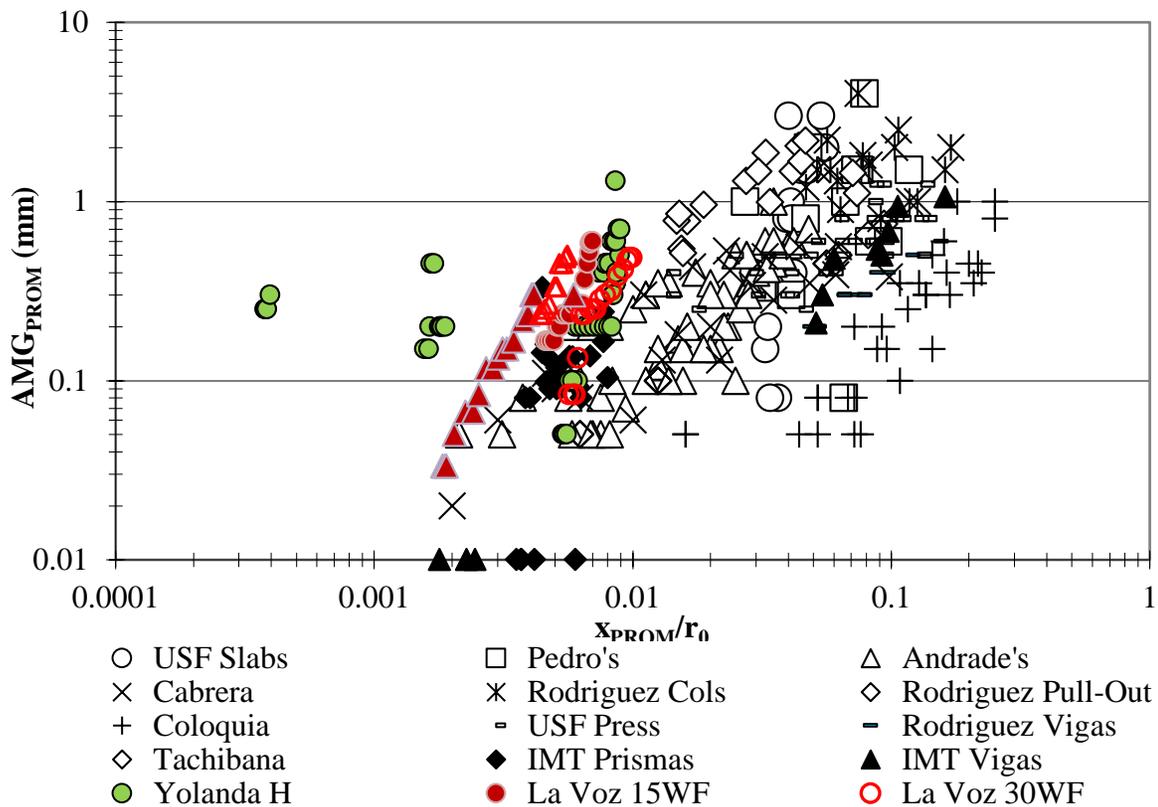


Figure 11. Compilación de la data del promedio del ancho máximo de grietas en relación a pérdida del área de sección transversal de la barra, para diferentes autores y condiciones de ensayo (Torres-Acosta and Martínez-Madrid, 2003)

En el caso de los métodos de corrosión acelerada, se observa que los datos siguen una buena tendencia y están cerca unos de otros (Torres-Acosta and Martínez-Madrid, 2003). Existe también diferencias entre la data de corrosión acelerada en concreto armado (símbolos Δ , x , \diamond , \circ , \times , \square) vs elementos de concreto pretensado (símbolo $+$) cuando la corrosión era uniforme; observándose grietas más anchas en los elementos de concreto reforzado que en los de concreto pretensado. Si la corrosión está localizada en una pequeña área del tensor (símbolo $-$) en lugar de ser generalizada (símbolo $+$), en los elementos de concreto pretensado, la tendencia de los anchos de grietas fue similar a la obtenida para concreto armado. Por lo tanto, si todo el tensor (o alambre) se corroe, la propagación de la grieta aparentemente se mitiga por el estado de compresión de los esfuerzos en el concreto, pero si el tensor pretensado (o alambre) se corroe solamente en una sección corta de

toda su longitud, la propagación de la grieta sigue la tendencia obtenida para elementos de concreto armado.

Por otra parte, como se observa en los símbolos coloreados, la data de corrosión natural presentó un comportamiento más disperso que la de corrosión acelerada. En general, la data de corrosión natural sigue una tendencia similar a la de corrosión acelerada, pero con mayor velocidad de propagación de grietas (más alta pendiente en la gráfica de ancho de grieta vs x/r_0). La mayor velocidad de propagación de grietas en las pruebas de corrosión natural, pueden indicar que la reparación de las grietas debe hacerse en una etapa más temprana que lo indicado por los ensayos acelerados. Este comportamiento debe chequearse con la selección de una mayor data de la literatura y del resto de estaciones del proyecto DURACON.

La data de esta investigación sigue una tendencia bien definida: se requiere menor pérdida de material inducido por corrosión para que las grietas aparezcan sobre la superficie del elemento de concreto. En condiciones naturales, parecidas a la de las probetas de la presente investigación, el concreto es afectado por el ingreso de los agentes agresivos tales como los iones cloruro, los cuales producen una ruptura localizada de la película pasiva hasta que los productos de corrosión se formen en suficiente cantidad para agrietar al concreto, lo cual depende de la calidad del mismo (porosidad interna). Este proceso de agrietamiento en concreto de baja calidad, puede requerir una menor cantidad de productos de corrosión para la formación y propagación de grietas (Torres-Acosta and Castro-Borges, 2013; Torres-Acosta et al., 2007). Pero comparado con previas investigaciones con probetas sometidas a corrosión natural y expuestas durante un período de 3 a 6 años (símbolos ■, ●, ◆), existe una diferencia de, aproximadamente, 10 veces la cantidad de masa necesaria para producir el mismo ancho de grieta.

Es importante recordar que la data de esta investigación se obtuvo de las determinaciones de pérdida de masa electroquímica por resistencia a la polarización lineal (o también conocida como R_p). Si la corrosión fuese uniforme, la pérdida de metal gravimétrica puede ser hasta dos veces la pérdida de masa farádica; pero si la corrosión de la barra es localizada (por ejemplo, corrosión por picaduras), la pérdida gravimétrica del metal puede ser hasta diez veces mayor que la pérdida farádica (González et. al., 1995). Toda la data de pérdida de radio mostrada en la Figura 11 fue estimada por el procedimiento gravimétrico, excepto la data de Hernández et.al.2016 (puntos de color verde) y de la presente investigación. En estas dos investigaciones, el estimado de la pérdida real de las barras tiene la particularidad de haberse determinado en concreto altamente poroso ($a_7c > 0,65$); por lo tanto, se esperaría una resistencia mecánica más baja y mayor facilidad para la formación de grietas.

Hernández et. al., 2016, utilizó un concreto similar para fabricar vigas que fueron, algunas de ellas, sometidas a carga al mismo tiempo que se expusieron a un regado con iones cloruro en su zona central para producir la corrosión, sin utilizar corrientes anódicas. Como se observa en la Figura 11, la data de las vigas cargadas (Hernández et. al., 2016) se separa de toda la data de corrosión natural y acelerada; produciéndose menor pérdida de radio para un mismo ancho de grietas ($AMG_{PROM.}$). Este comportamiento puede deberse, no solo a la posible diferencia entre pérdida de masa farádica y gravimétrica, sino también al esfuerzo de flexión en tensión aplicado, que puede incrementar la velocidad de propagación de la abertura de las grietas. En la misma referencia, algunas vigas no se cargaron, así la data de $AMG_{PROM.}$ vs. x_{PROM}/r_0 sigue una trayectoria similar a la obtenida en la presente investigación, donde los prismas de concreto armado se mantuvieron sin cargar durante la experimentación.

3.4 Correlación empírica entre la velocidad de corrosión del refuerzo y la velocidad de propagación de las grietas en la superficie

La Figura 12 muestra la propagación del ancho de grietas vs. el tiempo de exposición. Como se observa en esta figura, no existe correlación entre la profundidad de las barras y la propagación de

las grietas para estos especímenes localizados en la estación de ensayo La Voz, Venezuela. Dos de las grietas en cada profundidad de barras de refuerzo se comportaron en el mismo rango de anchuras de grietas máximas (entre 0,05 y 0,3 mm), y solo una de dichas grietas mostró grietas máximas más anchas (alrededor de 0,4 mm y superiores). Las líneas de regresión para cada propagación de grietas también se observan en la Figura 12, mostrando un buen ajuste, superior al 0,8. La pendiente de tales líneas de regresión se considera en esta investigación como la velocidad de propagación de grietas superficiales (VPGS en mm/mes).

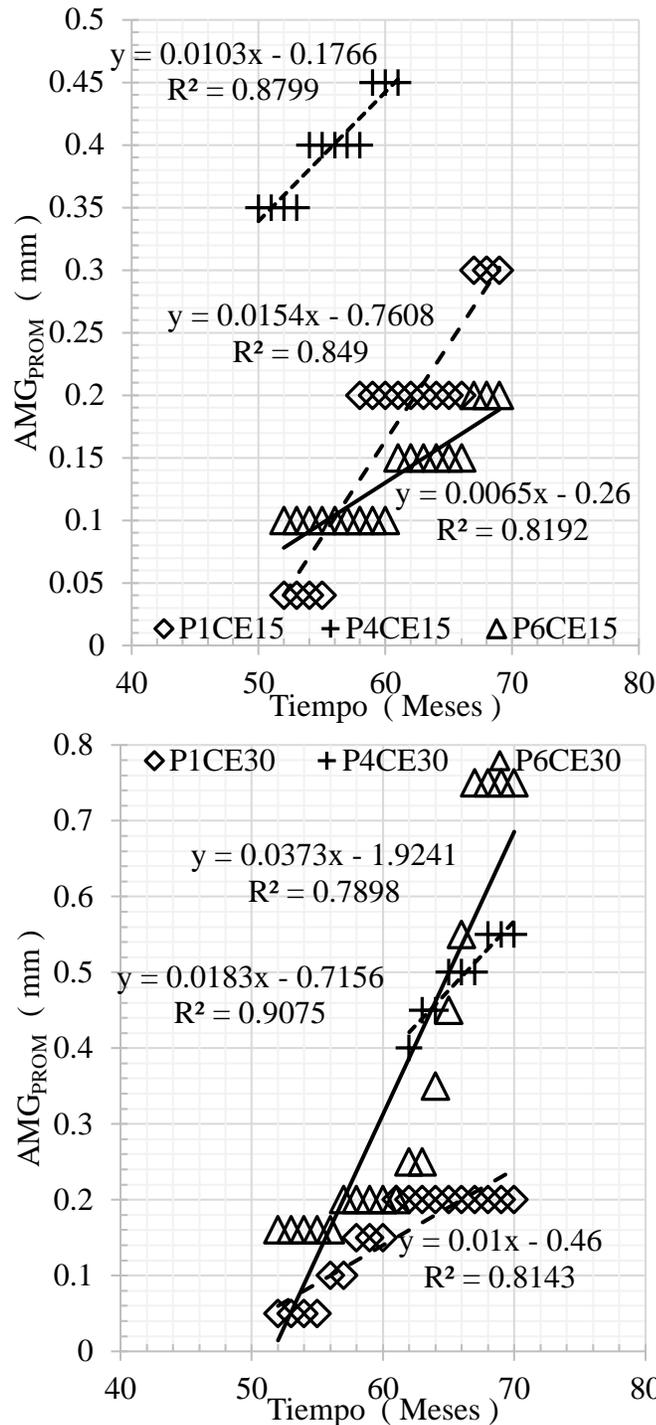


Figura 12. Estudio de propagación de grietas para especímenes de concreto con una relación a/c 0,65, cara expuesta, en la estación de ensayo natural La Voz, Venezuela (a) barra a 15 mm de profundidad y (b) barra a 30 mm de profundidad

En base a la data disponible hasta el momento, se desarrolló una correlación empírica entre VOGS e i_{CORR} , lo cual se muestra en la Figura 13. Como se observa en esta figura, no existe una diferencia aparente entre la correlación para las barras localizadas a 15 mm y 30 mm. A partir de datos experimentales adicionales, de la otra relación w/c, en la estación de ensayo La Voz, Venezuela, y de prismas de otras estaciones DURACON donde la corrosión se encuentre activa, se corroborará esta relación observada, en donde la velocidad de ensanchamiento de las grietas es directamente proporcional al i_{CORR} de la barra de refuerzo, que a su vez son los óxidos expansivos para producir tales grietas.

Esta correlación empírica ayudará a establecer un estimado indirecto de la velocidad de corrosión del acero de refuerzo con solo un estudio del ancho de grietas, el cual se lleva a cabo en un período de tiempo de al menos un año (12 meses); si la persona a cargo del mantenimiento de la estructura corroída no es capaz de tener equipos de prueba para determinar tales valores electroquímicos.

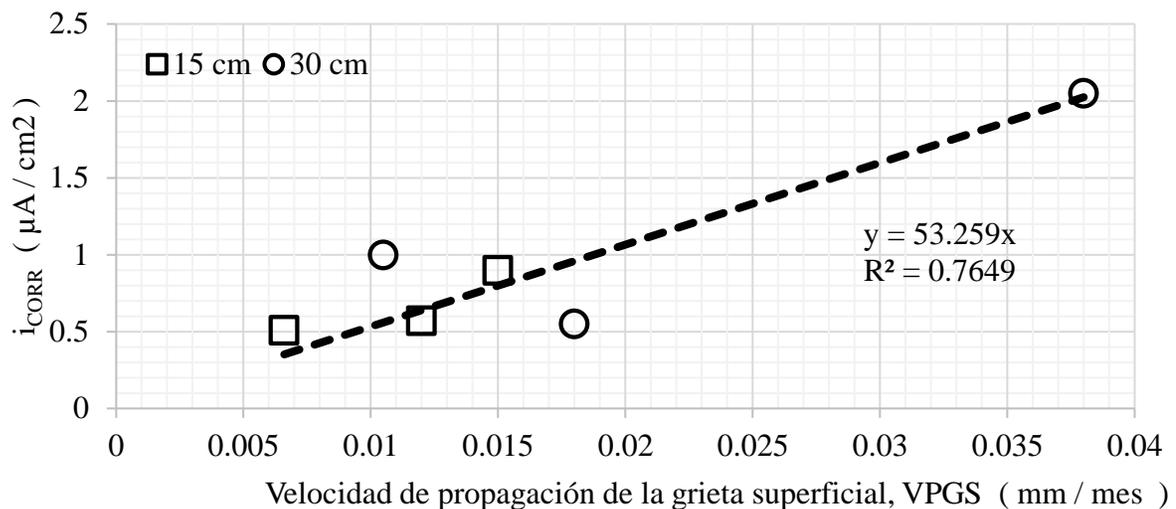


Figura 13. Correlación Empírica entre VPGS e i_{CORR} , Prismas de concreto con una relación a/c 0,65, estación de ensayos La Voz, Venezuela

3. CONCLUSIONS

1. Se encontró una excelente correlación entre el ancho máximo de grietas promedio ($AMG_{PROM.}$) y la pérdida de radio (x_{PROM}/r_0) inducida por corrosión (barras a 15 mm y 30 mm de recubrimiento de concreto en las caras expuestas y resguardadas de los vientos preferenciales, en especímenes con a/c 0,65); la cual puede utilizarse para predecir la pérdida de sección de la barra para un ancho de grieta dado.
2. La tendencia de la pendiente de $AMG_{PROM.}$ vs x/r_0 para la data de corrosión natural, fue más alta que la obtenida con la data de corrosión acelerada. Esto puede reducir el tiempo para la rehabilitación de elementos de concreto corroídos en estructuras expuestas a ambientes marinos.
3. Se estableció una correlación empírica entre la velocidad de propagación de las grietas (VPGS) e i_{CORR} para los especímenes con a/c 0,65 expuestos en la estación La Voz, Venezuela; lo cual puede ayudar a estimar i_{CORR} , indirectamente, si se conocen los valores de $AMG_{PROM.}$ del elemento corroyéndose, obtenidos en un período de tiempo de al menos 1 año.

4. RECONOCIMIENTOS

Los autores agradecen al CYTED y a la Universidad del Zulia por el financiamiento de esta investigación, y a todas aquellas personas que ayudaron con el monitoreo del levantamiento de grietas y la evaluación electroquímica por tan largo período de tiempo; lo cual no hubiese sido posible sin su ayuda. También nuestro agradecimiento al Dr. Douglas Linares por su ayuda en la traducción del trabajo.

5. REFERENCIAS

- Almusallam, A. A., Al-Gahtani, A. S., Maslehuddin, M., Khan, M. M., Aziz, A. R. (1997), *Evaluation of Repair Materials for Functional Improvement of Slabs and Beams with Corroded Reinforcement*. Proc. ICE-Struct. Build 122 (1): 27-34.
- Cabrera, J.G. (1996), *Deterioration of concrete due to reinforcement steel corrosion*, Cement and Concrete Composites, 18 (1), pp. 47-59. [https://doi.org/10.1016/0958-9465\(95\)00043-7](https://doi.org/10.1016/0958-9465(95)00043-7)
- Cabrera-Madrid, J. A., Balancán-Zapata, M., Torres-Acosta, A. A., Castro-Borges, P. (2014) “*Effect of tropical marine microclimates on depassivation and corrosion-induced cracking of reinforced concrete,*” International Journal of Electrochemical Science, vol. 9, pp. 8211 – 8225, ISSN: 1452-3981.
- Feliú, S., González, J. A., Feliú, V., Feliú, S. Jr., Escudero, M. L., Rodríguez Maribona, I. A., Ausin, V., Andrade, M. C., Bolano, J. A., Jimenez, F. (1933), *Corrosion detecting probes for use with a corrosion-rate meter for electrochemically determining the corrosion rate of reinforced concrete structures*, U.S., Patent 5259944 A.
- González, J. A., Andrade, C., Alonso, C., Feliú, S. (1995), *Comparison of rates of general corrosion and maximum pitting penetration on concrete embedded Steel reinforcement*. Cement and Concrete Research, 25 (2), pp. 257-264. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00006-2](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00006-2)
- Hernández, Y., de Rincón, O., Torres, A., Delgado, S., Rodríguez, J. (2016), “*Relación entre la Velocidad de Corrosión de la Armadura y el Ancho de Fisuras en Vigas de Concreto Armado Expuestas a Ambientes que Simulan el Medio Marino*”. Revista ALCONPAT, 6 (3), pp. 272-283. DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v6i3.152>.
- Huang, R., Yang, C. C. (1997), *Condition Assessment of Reinforced Concrete Beams Relative to Reinforcement Corrosion*. Cement and Concrete Composites, 19 (2), pp. 131-137. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(96\)00050-9](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(96)00050-9)
- ISO 9223:2012 (latest revision), “*Corrosion of metals and alloys -- Corrosivity of atmospheres -- Classification, determination and estimation*”, (Geneva, Switzerland: ISO).
- Mangat, P. S., Elgarf, M. S. (1999), “*Strength and serviceability of repaired reinforced concrete beams undergoing reinforcement corrosion*”. Magazine of Concrete Research, 51 (2), pp. 97-112. <https://doi.org/10.1680/mac.1999.51.2.97>
- Rodríguez, J., Ortega, L. M., Casal, J. (1997), *Load carrying capacity of concrete structures with corroded reinforcement*, Construction and Building Materials, 11 (4), pp. 239-248. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(97\)00043-3](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(97)00043-3)
- Tachibana, Y., Maeda, K. I., Kajikawa, Y., Kawamura, M. (1990). “*Mechanical behaviour of RC beams damaged by corrosion of reinforcement*. *Corrosion of Reinforcement in Concrete*” in Third International Symposium on Corrosion of Reinforcement in Concrete Construction, paper no. 00606810: Elsevier Science Publishers/CICC Publications, ISBN: 1-85166-487-4, May 21-24, p. 178-187.
- Torres Acosta, A.A. (1999) “*Cracking induced by localized corrosion of reinforcement in chloride contaminated concrete*”, Ph.D. Thesis, University of South Florida, Tampa, FL.

- Torres Acosta, A. A., Martínez Madrid, M. (2003), *Residual Life of Corroding Reinforced Concrete Structures in Marine Environment*. Journal of Materials in Civil Engineering, 15 (4), pp. 344-353. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2003\)15:4\(344\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2003)15:4(344))
- Torres Acosta, A. A., Hernández, Y., Troconis de Rincón, O., Delgado, S., Rodríguez, J. (2007). “*Agrietamiento de vigas de concreto por corrosión del acero de refuerzo cuando se les aplica una carga externa permanente,*” Boletín del Instituto Mexicano del Transporte (IMT), Notas 109, N°2, <http://ww.imt.mx/SitioIMT/Boletines/resumen-boletines.aspx?IdArticulo=314&IdBoletin=110> (Aug. 05, 2014).
- Torres-Acosta, A. A. and Castro-Borges, P. (2013). “*Corrosion-Induced Cracking of Concrete Elements Exposed to a Natural Marine Environment for Five Years*”, Corrosion, v. 69, No. 11, November, pp. 1122-1131, ISSN: 0010-9312.
- Troconis de Rincón, O., et al. (2007), “*Effect of the marine environment on reinforced concrete durability in Iberoamerican countries: DURACON project/CYTED*”. Corrosion Science, 49 (7), pp. 2832-2843, <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2007.02.009>
- Vidal, T., Castel, A., Françoise, R. (2004), “*Analyzing crack width to predict corrosion in reinforced concrete*”, Cement and Concrete Research, 34 (1), pp. 165-174. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00246-1](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00246-1)