

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

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

* Autor de Contato: oladistdr@gmail.com

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

Recepção: 12/06/2018 | Aceitação: 02/08/2018 | Publicação: 31/08/2018

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.

Citar como: O. Troconis de Rincón, V. Milano, A. A. Torres-Acosta, Y. Hernández-López (2018), “Correlação entre a abertura da fissura e a taxa de corrosão na durabilidade do concreto armado em um ambiente marinho tropical altamente agressivo”, 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.

Informações legais

Revista ALCONPAT é uma publicação trimestral da Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação de Construção, Internacional, A.C., Km. 6, antiga estrada para Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Website: www.alconpat.org

Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de direitos de uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antiga estrada para Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310.

As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

É totalmente proibida a reprodução total ou parcial dos conteúdos e imagens da publicação sem autorização prévia do ALCONPAT International A.C.

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no segundo número do ano 2019, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do primeiro número do ano de 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.

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

RESUMEN

El objetivo de esta investigación fue 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; los cuales tienen 6 varillas de refuerzo a diferentes cobrimientos (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.

1. INTRODUÇÃO

Durante os últimos 20 anos, o termo durabilidade do concreto tem sido usado com mais frequência entre os membros da sociedade científica em todo o mundo. Em alguns países desenvolvidos como os Estados Unidos, Espanha, França, Reino Unido e Japão, a durabilidade tem sido endereçada a um assunto muito importante, atraindo sete números de investimento para pesquisa nessa área. A deterioração da estrutura do concreto armado devido à corrosão da armadura aumentou como consequência de fissuras na superfície do cobrimento do concreto.

Muitas investigações até agora foram realizadas com base no estudo da durabilidade durante o período de iniciação. No entanto, muito poucos se concentraram em seu desempenho durante sua vida útil residual.

Alguns estudos relacionados ao estágio de vida útil residual de estruturas de concreto foram feitos onde a corrosão acelerada foi realizada pela aplicação de corrente anódica constante às armaduras (Tachibana, et.al., 1990, Huang e Yang, 1997, Rodriguez et.al., 1997, Almusallam, et al., (1997), Cabrera, 1996).

Após a aplicação de tais correntes anódicas na armadura em um curto período de tempo, a redução da capacidade estrutural foi correlacionada com parâmetros de corrosão como perda de metal gravimétrica e fissuras de concreto induzidas por corrosão (Almusallam, 1997; Mangat e Elgarf,

1999; Torres-Acosta, 1999). Torres-Acosta, 1999; Torres-Acosta e Martínez-Madrid, 2003, realizaram vários estudos relacionados a este assunto, mas também em condições naturais (Torres-Acosta e Castro-Borges, 2013, Cabrera-Madrid et al, 2014).

Em uma investigação anterior (Torres-Acosta e Martínez-Madrid, 2003), eles relataram resultados em parâmetros de degradação de vida útil residual, usando lajes de concreto armado (proporção de a/c de 0,42, contaminação por cloreto durante a mistura para acelerar a corrosão da armadura) e sem aplicação de corrente anódica. Ao final do experimento, a posição, a abertura e o comprimento da fissura induzida pela corrosão foram medidos e as correlações com a perda de massa do corte transversal também foram realizadas.

Com base nos resultados experimentais, estabeleceram-se relações empíricas entre a perda média do diâmetro da armadura ($xAVG$) dividida pelo diâmetro original da armadura (r_0) e a capacidade de carga. Como exemplo, a perda de diâmetro de 10% pode resultar em uma perda de 50% na capacidade de carga em elementos de vigas de concreto armado. Eles também desenvolveram uma relação empírica entre abertura de fissura, WC e a relação $xAVG/r_0$. Aparentemente, quando a taxa de corrosão é pequena ($12-60 \mu\text{m y}^{-1}$), as fissuras aparecem e crescem em comprimento e abertura mais rapidamente do que nos ensaios de corrosão acelerada.

Finalmente, a última correlação empírica obtida incluiu $xAVG$ e cobertura máxima do pite ($PITMAX$), dando um fator de sete vezes: $PITMAX \sim 7 \cdot xAVG$ (Torres-Acosta e Martínez-Madrid, 2003).

Posteriormente, em 2003, Vidal et.al. estudou-se a abertura da fissura e a perda do diâmetro da armadura devido à corrosão em vigas de concreto armado (0,5 a/c, 35 g l-1 de contaminação com NaCl). Eles discutiram que a corrosão de armadura obtida nesta investigação está mais próxima do que é observado em condições naturais (com relação à distribuição de corrosão, tipos de corrosão e óxidos produzidos).

Eles desenvolveram um novo modelo sobre abertura de fissuras vs. perda de seção transversal da armadura e observaram que a seção transversal da armadura parece ser independente de seu diâmetro e da relação cobertura de concreto/armadura, exceto quando avaliada no período de início da fissura.

Em 2007, Torres-Acosta et.al. relataram uma correlação empírica entre a taxa de corrosão da armadura e a abertura da fissura, usando vigas de concreto armado (0,6 a/c, contaminadas com NaCl: 1% em peso de base Cl-on) e submetidas à flexão.

As vigas foram pulverizadas em uma área central de 25 cm de comprimento duas vezes por semana, com solução salina (3,5% em massa de Cl⁻), a fim de acelerar a corrosão da armadura nesta área. Eles concluíram que no processo natural de corrosão, as fissuras se desenvolveram mais vagarosamente (em abertura e comprimento) do que aquelas geradas pela corrosão acelerada. Os resultados obtidos mostraram que, para uma perda de diâmetro por corrosão ($xAVG/r_0$) de 4% a 10%, foram produzidas fissuras com abertura máxima ($CWMAX$) de 0,1 mm e 1 mm, respectivamente.

A tendência obtida neste estudo foi semelhante à obtida em pesquisas anteriores com corrosão natural (Torres-Acosta e Castro-Borges, 2013, Cabrera-Madrid et al, 2014).

O presente trabalho mostra os resultados de um dos locais de exposição natural do projeto DURACON (La Voz, Venezuela). Localizou-se em um ambiente marinho costeiro de alta agressividade, onde alguns dos prismas de concreto armado (0,65 a/c) neste projeto apresentaram fissuras induzidas por corrosão superficial, e obteve-se uma correlação empírica entre abertura máxima de fissuras e taxa de corrosão ($iCORR$) expressa como perda média de diâmetro de armadura ($xAVG/r_0$) de dados de corrosão natural.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

2.1 Corpos de prova prismáticos

Nesta investigação, foram utilizadas amostras prismáticas de concreto armado do projeto DURACON (Troconis de Rincon et.al., 2007). Estes foram instalados em locais de exposição natural do projeto chamados La Voz (na Venezuela), classificados como ambientes marinhos de agressividade muito alta (> C5 segundo ISO ⁽¹⁾ 9223: 2012. A Figura 1 mostra um diagrama esquemático das amostras prismáticas sob avaliação. Prismas de concreto de 15x15x30 cm (relação a/c de 0,65) e reforçados com seis barras (9,5 mm de diâmetro), colocados em diferentes cobrimentos de concreto (dois de 15, 20 e 30 mm cada).

Três deles foram posicionadas com faces à barlavento e os outros três com faces à sotavento. As extremidades de cada barra foram protegidas com revestimento de epóxi para evitar o diferencial de oxigênio e a corrosão em fresta, deixando uma parte central de 15 cm de comprimento descoberta. A Figura 2 mostra os suportes de amostra instalados na estação de ensaio La Voz.

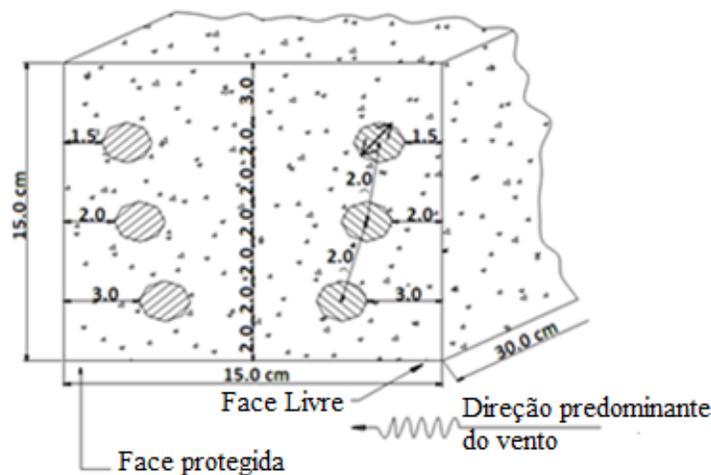


Figura 1. Diagrama esquemático da configuração das barras no corpo de prova

2.2 Avaliação ambiental

Os parâmetros climáticos e ambientais foram avaliados de acordo com a metodologia estabelecida pela norma ISO 9223, determinando a agressividade ambiental na estação de ensaio. Parâmetros como umidade relativa (UR), tempo de umidade (TOW/τ), velocidade e direção do vento, quantidade de chuva, temperatura diária, concentração de cloretos, concentração de CO_2 e concentração de compostos sulfurados foram medidos durante o período experimental. É importante mencionar que atualmente não existem normas para identificar a agressividade do ambiente para estruturas de concreto armado; portanto, o padrão ISO para materiais metálicos foi usado como uma primeira abordagem.



Figura 2. Estação de ensaio em ambiente marinho (La Voz)

2.3 Avaliação eletroquímica

Para monitoramento eletroquímico, foi utilizado um instrumento de corrosão de campo GECOR 6^(†1), que mediu o potencial de corrosão (ECORR, eletrodo de referência Cu/CuSO₄) e taxa de corrosão (iCORR) da armadura pela técnica de polarização linear (Feliú et al. .al., 1993).

2.4 Inspeção de fissuras

Fissuras na superfície do concreto induzidas por corrosão da armadura, tanto na face de barlavento quanto na face de sotavento foram monitoradas por um exame visual cuidadoso usando uma grade (não padronizada) de 15cm x 30cm para relatar o comprimento e localização de cada fissura por corrosão. Aberturas foram medidas usando um fissurômetro. Desse modo, um mapa geral de fissura foi registrado, mostrando o comprimento, a localização e a abertura de todas as fissuras em todas as amostras.

Os dados experimentais foram ajustados linearmente e comparados com dados obtidos por outros autores com técnicas de corrosão natural e acelerada. Para avaliar a perda da seção transversal da armadura, foi feita uma estimativa usando a área sob iCORR vs. o gráfico de tempo. Este valor foi então correlacionado com a máxima abertura de fissura (MCW), correspondente a cada uma das barras das amostras ensaiadas. Estimativas de perda de massa da armadura foram calculadas usando a lei de Faraday (Equação [1]):

$$\Delta W_f = \frac{55.5}{n \times F} \left(\int I dt \right) \quad (1)$$

Onde: ΔW_f é perda de massa segundo a lei de Faraday (g); 55,85 g/mol é o peso atômico do Fe; $\int I dt$ é a área sob a curva iCORR vs. tempo; n é o número de valência para ferro (+2) e F é a constante de Faraday (96.500 C/mol). Este valor é então usado para estimar a perda média de diâmetro devido à corrosão (XAVG), em mm, que é calculada usando a Equação (2):

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

Onde: ρ , densidade de ferro (gr/cm³); D , diâmetro da armadura (mm) e l , o comprimento da armadura (mm).

No final da experimentação, as amostras de concreto foram demolidas e as barras de aço foram recuperadas para determinar a perda real da seção transversal com base nas estimativas médias da cobertura dos pites.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Avaliação ambiental

A Figura 3 mostra os resultados dos parâmetros meteorológicos do local de ensaio natural monitorado durante o tempo de exposição. É claro observar os períodos de chuva-seca, típicos de ambientes tropicais. Houve apenas um curto período de alta precipitação pluviométrica e foi no final do ano de 2006, como resultado do fenômeno climático causado pelo furacão Ivan, que passou pelas Pequenas Antilhas e pelo Mar do Caribe.

Em relação à temperatura média mensal, variou apenas 3°C durante todo o período de avaliação (seis anos). O valor mínimo foi de 26,7°C (março de 2003 e fevereiro de 2009), enquanto o valor máximo foi de cerca de 30°C (outubro de 2004 e setembro de 2008). As pequenas variações

observadas para este parâmetro mostram uma estabilidade climática nesta estação de ensaio e na própria região geográfica.

O maior valor médio mensal de umidade relativa (UR) de todo o período de avaliação foi observado em agosto de 2004, que foi de 84%. Isso coincide com o maior valor de precipitação pluviométrica para o ano.

Para os dados da velocidade do vento, em geral, pode-se observar que ela varia entre 17 e 24 km/h, com grandes variações quando ocorrem mudanças repentinas no microclima, como os fenômenos que foram explicados acima onde a velocidade do vento foi substancialmente aumentada. As estimativas de cloreto e sulfato presentes nesta atmosfera e o tempo de umidade durante o tempo de exposição de 6 anos são mostrados na Tabela 1. Um ambiente corrosivo muito alto, de acordo com ISO 9223, para os primeiros três anos desta estação de ensaio, foi corroborado sobre o monitoramento de parâmetros na Tabela 1.

Para o 4º e 5º ano, notou-se uma diminuição na corrosividade, possivelmente devido à alta precipitação de tempestades e furacões ocorridos naqueles anos; no entanto, permanece altamente corrosivo. O tempo de umidade (TOW) também foi estimado com os parâmetros climáticos, como temperatura e UR, usando o procedimento ISO (ver Tabela 1).

Tabela 1. Agentes agressivos e tempo de umidade (TOW) na estação de ensaio La Voz

Tempo de Avaliação	Cloretos ($\text{mg m}^{-2}\text{d}^{-1}$) /S		Sulfetos ($\text{mg m}^{-2}\text{d}^{-1}$) /P		TOW (hy^{-1}) / τ		ISO 9223 Classe de Corrosividade
1	683.907	S3	22.645	P1	4818	τ_4	C5
2	382.561	S3	27.800	P1	4818	τ_4	C5
3	128.898	S2	19.726	P1	6132	τ_5	C5
4	154.159	S2	13.111	P1	3451	τ_4	C4
5	165.691	S2	5.616	P0	2823	τ_4	C4
6	183.682	S2	-	-	-	-	-

A corrosão induzida pelo ataque de íons cloreto foi favorecida, pois a alta umidade relativa facilita o transporte de agentes agressivos na atmosfera, realçados pela alta temperatura, que acelera a corrosão localizada das barras.

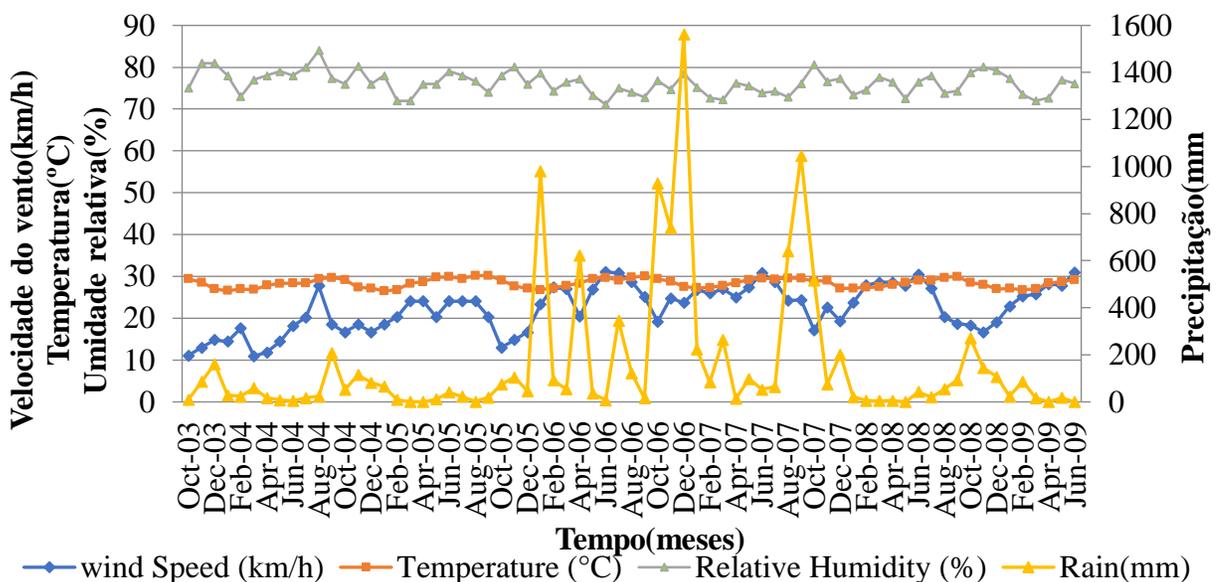


Figura 3. Comportamento dos parâmetros meteorológicos na estação de ensaio La Voz.

3.2 Parâmetros eletroquímicos

As Figuras 4 e 5 mostram os resultados obtidos no monitoramento eletroquímico: potencial de corrosão e taxa de corrosão x tempo para armaduras de concreto com 15 mm e 30 mm de cobrimento, respectivamente.

Estes números mostram claramente o tempo em que as barras começaram a despassar (ECORR e iCORR mais negativas do que -250 mV vs. Cu/CuSO₄ e maiores que 0,1 µA/cm², respectivamente); coincidindo com a primeira mudança na inclinação da taxa acumulada de corrosão vs curva do tempo.

Além disso, esses números mostram que vergalhões com 30 mm de cobrimento permaneceram passivos por mais tempo do que os vergalhões de 15 mm de cobrimento, mas a taxa de propagação para o primeiro conjunto foi maior que o segundo conjunto. Isto pode ser devido aos ventos no local de ensaio natural de La Voz que não mostraram uma direção preferencial do vento (Nordeste neste caso), mas sim ventos cortantes que também permitem a entrada e difusão de íons de cloreto através da face inferior do prisma. Esta foi a face superior e a mais porosa, que foi a mais próxima das barras mais profundas (barras de 30 mm de cobrimento), apresentando assim um desempenho incomum.

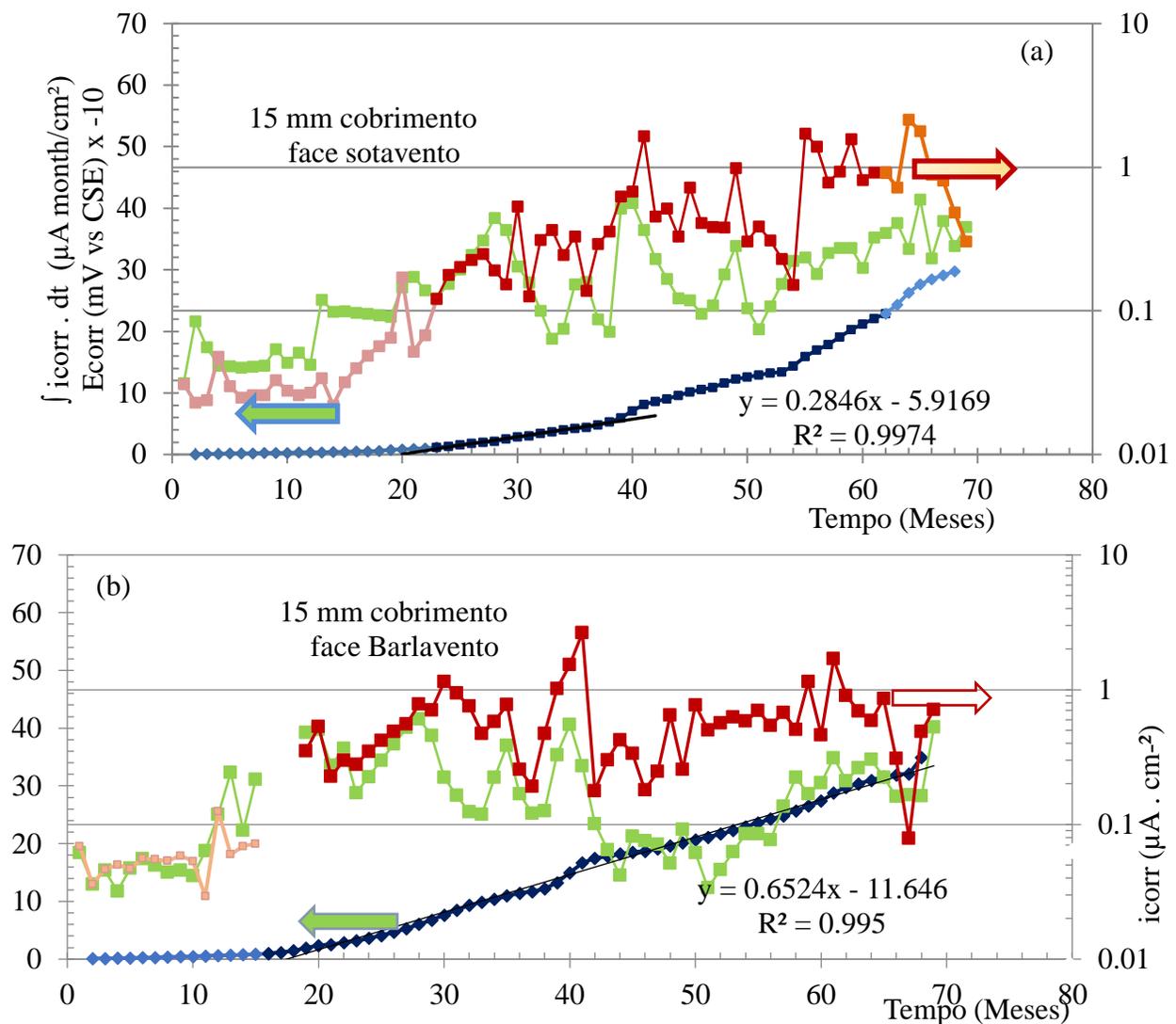


Figura 4. Monitoramento de parâmetros eletroquímicos (E_{CORR} ; i_{CORR} e valores de i_{CORR} acumulados) vs. Tempo para 15-mm de cobrimento, faces sotavento (a) e barlavento (b).

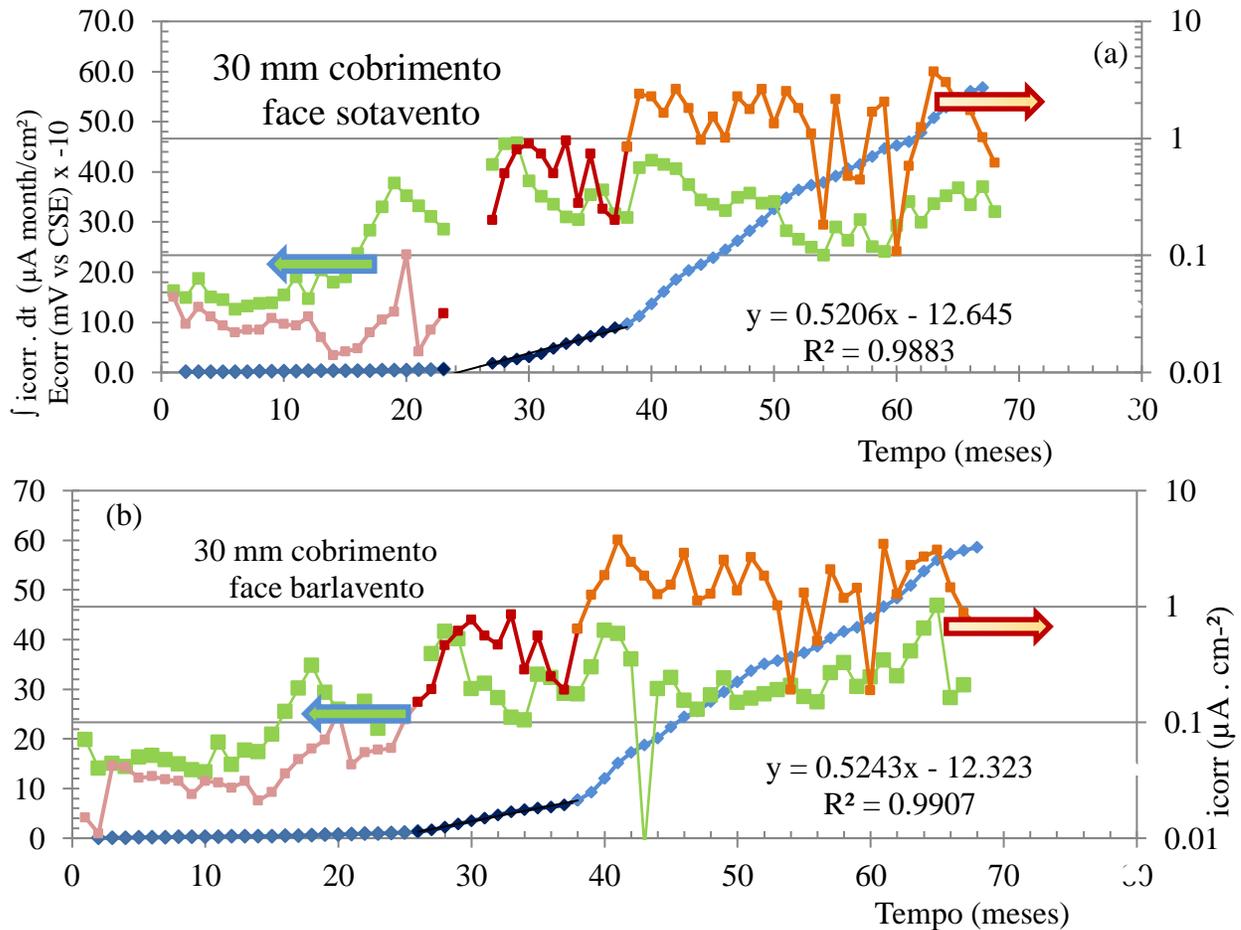


Figura 5. Monitoramento de parâmetros eletroquímicos (E_{CORR} ; i_{CORR} e valores de i_{CORR} acumulados) vs. Tempo para 30-mm de cobrimento, faces sotavento (a) e barlavento (b).

3.3 Abertura de fissura e correlação da taxa de corrosão

A Figura 6 mostra o estado em que uma das três amostras representativas foi encontrado após um período de exposição de 6 anos no local de ensaio natural de La Voz. Esta figura também mostra uma fotografia da face de barlavento da amostra e uma representação esquemática do levantamento superficial de fissuras/fissuras que apresentou tal amostra.

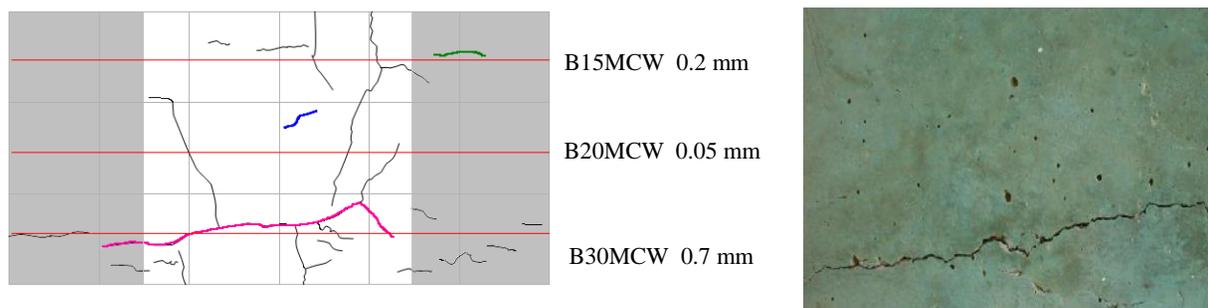


Figure 6. Amostra 6 (relação a/s de 0,65 e face de barlavento) pesquisa de fissura superficial (esquerda) e evidência fotográfica de tal fissura (direita)

A Figura 7 mostra que, com o aumento da perda de área da seção transversal das armaduras (estimada a partir dos dados $\int CORR dt$ e equações 1 e 2), a superfície MCW também aumenta (na face de barlavento da amostra). O efeito do cobrimento de concreto na iniciação e propagação da fissura (na face de barlavento) também foi demonstrado na Figura 7: as aberturas das fissuras foram maiores nas barras com menor cobrimento de concreto tendo a mesma perda na seção transversal

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

da armadura. Isso pode ser devido ao efeito simultâneo de alta umidade relativa predominante na área (> 80%), juntamente com um alto teor de íons cloreto, que mantém a umidade dentro do concreto, de tal forma que os íons cloreto (129-684 mg m⁻²d) pode difundir-se facilmente, promovendo corrosão de armadura.

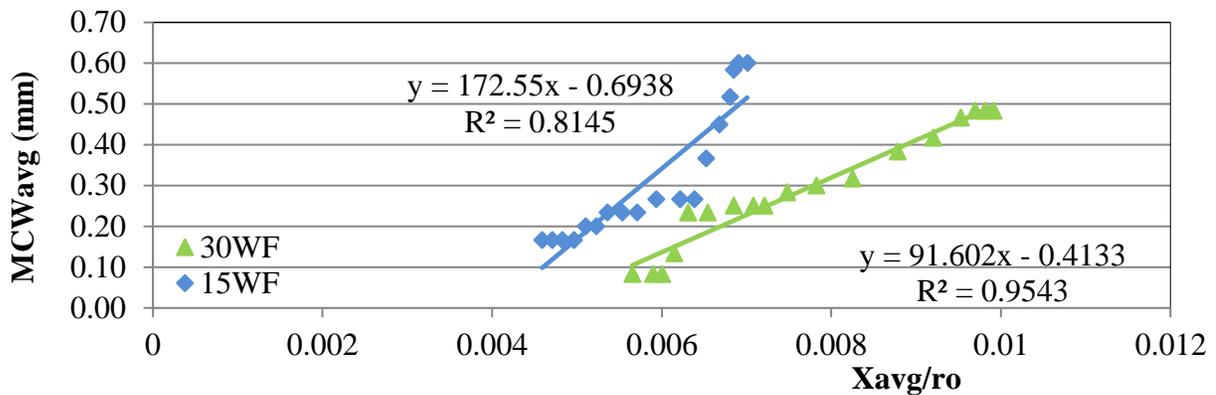


Figura 7. Abertura máxima de fissura do concreto em relação à perda da seção transversal da armadura, no local de ensaio natural La Voz, relação a/c 0,65, face de barlavento

Também é importante mencionar que existe uma relação direta entre o MCW e o xAVG/r0 da armadura. A qualidade da correlação é alta nos primeiros anos de exposição (MCW <0,3 mm), enquanto que para MCWs maiores que 0,3 mm os dados foram dispersos, fazendo com que a correlação diminuísse. Além disso, o MCW médio aumenta com muito pouca perda de material devido à corrosão. Além disso, quando os MCWs são muito largos, foram criados vazios, o que interferiu na medição do iCORR usando o instrumento corrosímetro de campo descrito.

Isso levanta algumas dúvidas sobre os dados iCORR do ano passado, que foram usados para obter xAVG/r0. Assim, foi necessário descartar as últimas medições da iCORR e determinar a correlação entre MCW e xAVG/r0 usando dados do primeiro ano.

Uma correlação mais representativa entre MCW e xAVG/r0 é apresentada na Figura 8, onde os últimos anos das medidas de viés da iCORR de ambas as barras foram removidas, assim melhores correlações foram obtidas (R2 ~ 0,9722 e 0,9038 para vergalhões de 15 mm e 30 mm), respectivamente).

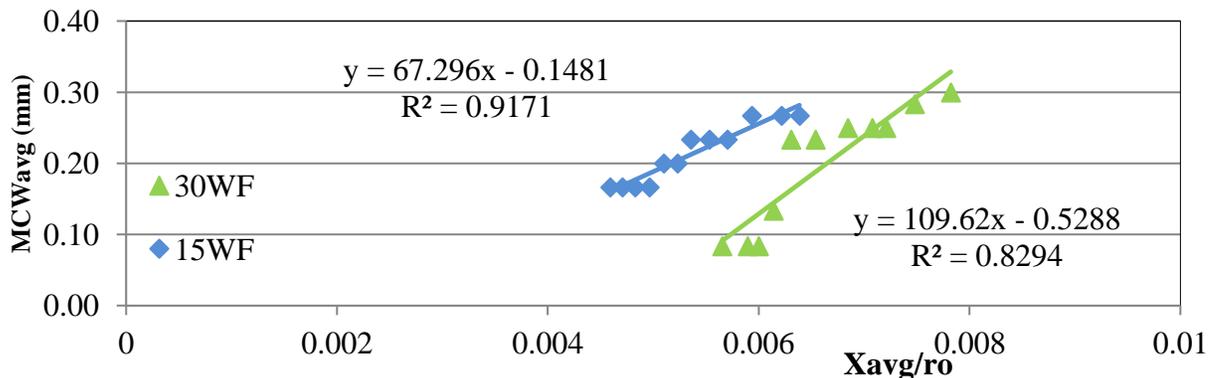


Figura 8. Comportamento representativo (dados do ano anterior removidos) da abertura máxima de fissura do concreto em relação à perda da seção transversal da armadura, no local de ensaio natural La Voz, relação a/c 0,65, face de barlavento

A Figura 9 mostra uma pesquisa típica de fissuras e a fotografia de uma das faces de sotavento da amostra a partir de uma amostra de concreto representativa de a/c 0,65, após 6 anos de exposição.

Como observado a partir desses resultados, fissuras mais amplas foram observadas em relação à face de barlavento. Esse desempenho pode ser devido ao fato de permanecer úmido por períodos de tempo mais longos, o que favorece o transporte de agentes agressivos do ambiente característico e a se espalhar na massa de concreto em comparação com a face de barlavento, que estava em contato contínuo com alta velocidade vento que poderia secar a umidade interna do concreto. Este desempenho é observado também nas Figuras 4 e 5, onde as taxas de corrosão dos vergalhões da face de sotavento mostram pequenos incrementos no final do período de exposição.

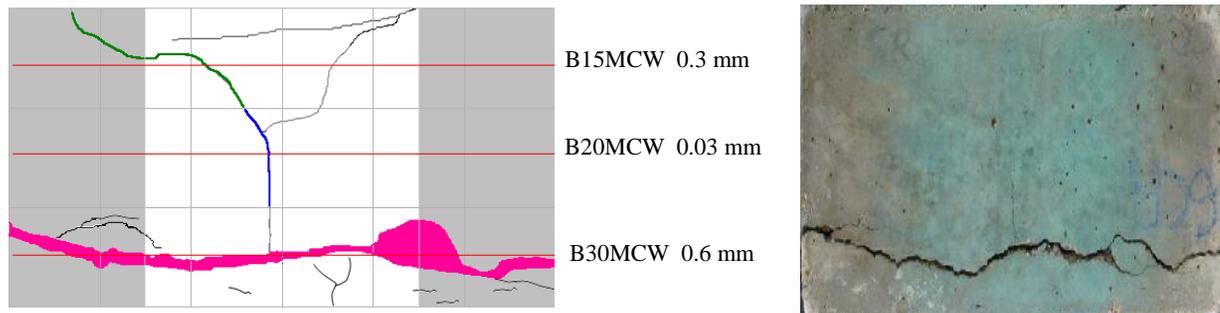


Figura 9. Esquerda, mapa geral de fissuras e à direita, foto do corpo de prova 6, relação a/c 0,65, face de sotavento

Similarmente aos dados da face de barlavento, os dados da face de sotavento não tiveram boa correlação entre o MCW e $xAVG/r0$ da armadura quando as fissuras foram maiores que 0,5 mm, e os dados do ano passado também foram viéses. Assim, na Figura 10, a relação mais representativa entre MCW e $xAVG/r0$ foi obtida pela remoção dos dados do ano passado das duas barras, o que melhora significativamente a correlação ($R^2 \sim 0,9397$ e $0,9843$ para a cobertura de 15 mm e 30 mm, respectivamente).

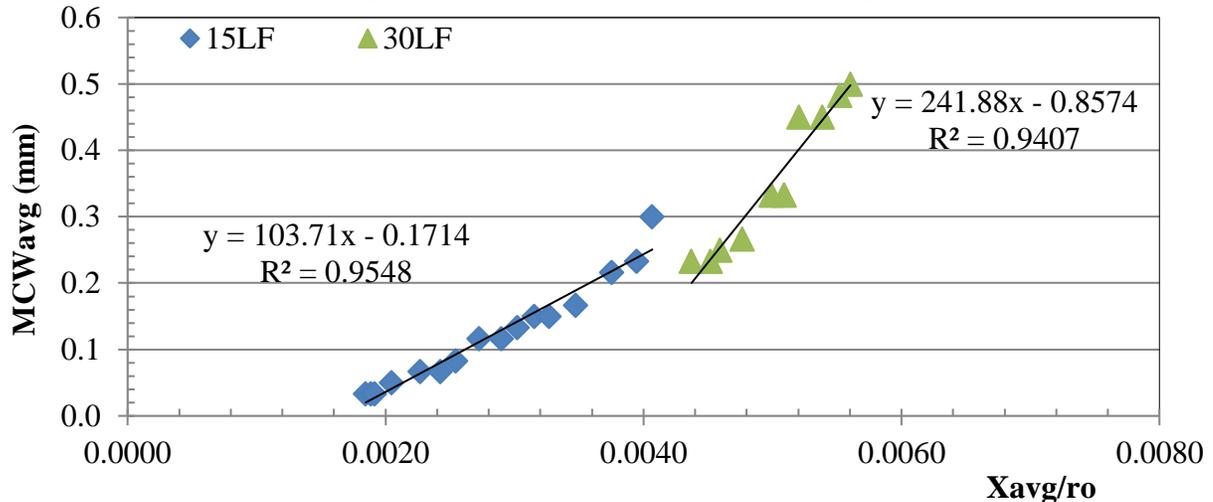


Figura 10. Comportamento representativo (dados do ano anterior removidos) da abertura máxima da fissura em relação à área da seção transversal da perda da barra na estação de ensaio La Voz, relação a/c 0,65, face a sotavento

Por outro lado, o efeito do cobrimento de concreto na propagação de fissuras inesperadamente foi o oposto do desempenho de barlavento: as maiores aberturas de fissura foram encontradas para armadura de 30 mm de cobrimento. Isto pode ser devido a (como explicado na Seção 3.2) que os ventos no local de ensaio natural de La Voz não mostraram uma direção preferencial do vento de comércio (Nordeste neste caso), mas sim ventos cortantes que também permitem o ingresso e a difusão de íons cloreto através da face inferior do prisma. Esta era a face superior e a mais porosa e mais próxima das barras mais profundas (armadura de 30 mm de cobrimento), apresentando assim um desempenho incomum.

A Figura 11 mostra como uma comparação, uma compilação dos dados MCWavr (média MCW) e x_{avr}/r_0 obtidos nesta investigação juntamente com dados de uma investigação anterior (Torres-Acosta e Martínez-Madrid, 2003) com condições de corrosão natural e acelerada. Os dados de corrosão acelerada foram plotados na Figura 11 usando símbolos sem qualquer cor de preenchimento, quando comparados os símbolos de dados de corrosão natural, que são preenchidos com preto para dados de investigações anteriores ou azul-rosa-laranja para os dados desta investigação.

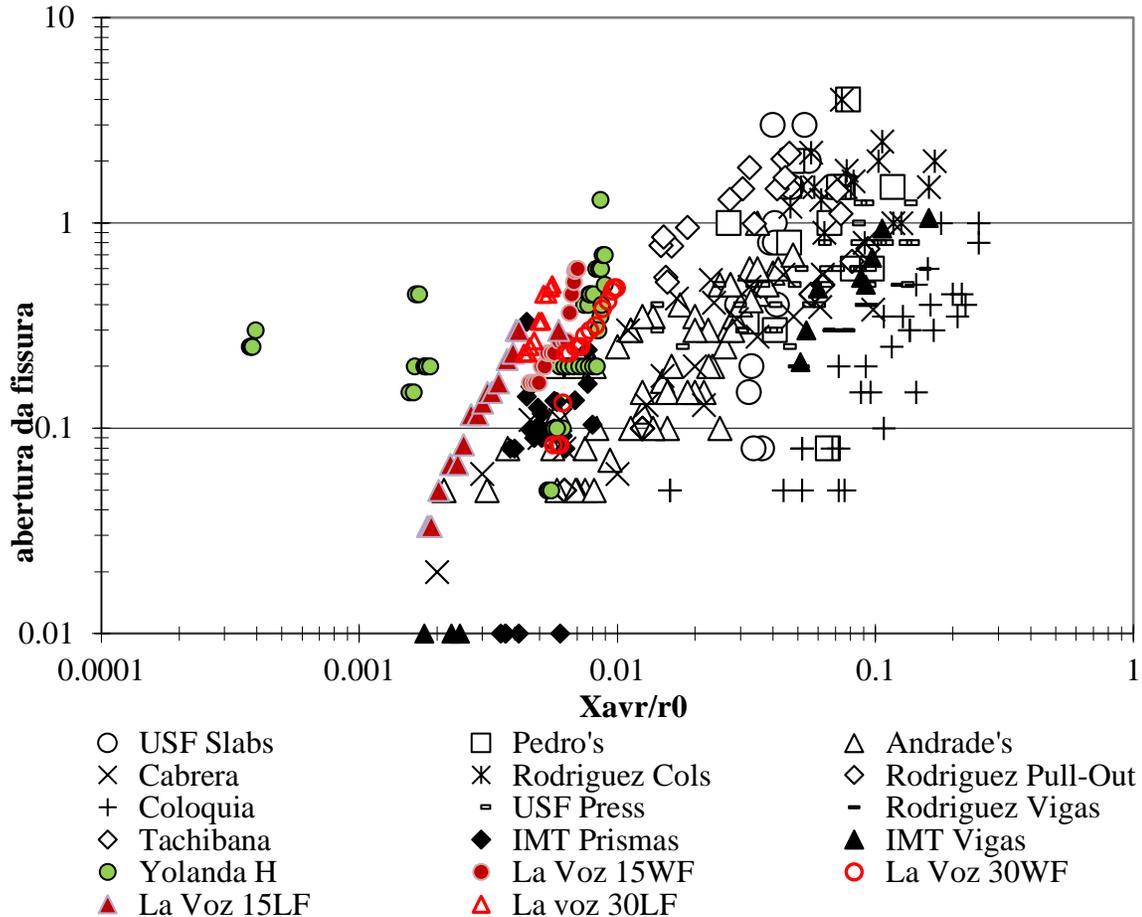


Figura 11. Compilação de dados da abertura máxima de fissura em relação à perda de área da seção transversal da barra para diferentes autores e condições de teste (Torres-Acosta and Martínez-Madrid, 2003)

Observa-se que, no caso dos métodos de corrosão acelerada, os dados seguem uma boa tendência e estão próximos uns dos outros (Torres-Acosta e Martínez-Madrid, 2003). Há também uma diferença entre os dados de corrosão acelerada de concreto armado (Δ , \times , \diamond , \circ , \times , \square símbolos) versus elementos de concreto protendido (símbolo +) quando corrosão geral foi obtida: fissuras mais amplas foram observadas de elementos de concreto armado do que de elementos de concreto protendido. Se a corrosão estiver localizada em uma pequena área do fio (símbolo) nos elementos de concreto protendido em vez da corrosão geral (símbolo +), a tendência da abertura das fissuras foi semelhante à obtida em elementos de concreto armado.

Portanto, se toda a cordoalha protendida (ou fio) estiver corroída, a propagação da fissura aparentemente foi mitigada pelo estado compressivo de tensões no concreto, mas se a cordoalha protendida (ou fio) corrói apenas em uma pequena porção de todo o comprimento, a propagação da fissura segue a tendência dos elementos de concreto armado.

Por outro lado, os dados de corrosão natural apresentaram um desempenho mais dispersivo do que a corrosão acelerada, como visto nos símbolos coloridos. Em geral, os dados de corrosão natural seguem uma tendência semelhante à dos dados de corrosão acelerada, mas com maior abertura de fissuras (maior abertura de fissura \times inclinação x/r_0). A maior taxa de propagação de fissuras nos ensaios de corrosão natural pode indicar que o reparo de fissura pode ser feito antes do obtido a partir de ensaios de corrosão acelerada. Esse desempenho deve ser verificado com a coleta de dados maiores da literatura e dados nos resultados restantes do projeto da DURACON.

Os dados desta investigação seguem uma tendência bem definida: menos perda de material induzida por corrosão é necessária para que as fissuras apareçam na superfície do elemento de concreto. Em condições naturais, como os exemplares da presente pesquisa, o concreto é afetado pela entrada de agentes agressivos, como íons cloretos, que produzem uma ruptura localizada do filme passivo até que sejam formados produtos de corrosão em quantidade suficiente para quebrar o concreto, que depende qualidade do concreto (porosidade interna).

Esse processo de fissuração em concreto de baixa qualidade pode requerer uma quantidade menor de produtos de corrosão para formação e propagação de fissuras (Torres-Acosta e Castro-Borges, 2013; Torres-Acosta et al., 2007). Mas em comparação com investigações anteriores com amostras de corrosão naturais expostas durante um período entre 3 e 6 anos (símbolos ■, ●, ◆), há uma diferença de, aproximadamente, 10 vezes a quantidade de massa necessária para produzir a mesma abertura de fissura.

É importante lembrar que os dados desta investigação foram obtidos a partir de determinações eletroquímicas de perda de massa, principalmente a resistência de polarização linear (ou também conhecida como R_p). Se a corrosão fosse uniforme, a perda de metal segundo a lei de Faraday poderia ser o dobro da perda de metal gravimétrica estimada, mas se a corrosão da armadura estiver localizada (corrosão por pite), a perda de metal segundo a lei de Faraday poderia ser estimada até dez vezes a perda de metal gravimétrica (González et al., 1995).

Todos os dados de perda de diâmetro da armadura na Figura 11 foram estimados a partir do procedimento gravimétrico, exceto os dados de Hernández et.al.2016 (pontos de cor verde) e a presente investigação. As estimativas reais de perda de seção nessas duas investigações também têm a particularidade de serem realizadas em concreto altamente poroso (com relação $a/c > 0,65$), portanto, menor resistência mecânica e fácil formação de fissura também são esperadas.

Um tipo de concreto semelhante foi usado por Hernández et.al., 2016, para fabricar vigas onde algumas foram carregadas ao mesmo tempo em que foram expostas à solução com cloreto no centro dos elementos de viga para produzir corrosão sem usar correntes anódicas. Como visto na Figura 11, os dados de vigas carregadas (Hernández et.al., 2016) separam todos os dados naturais e acelerados para reduzir a perda de diâmetro para a mesma abertura do MCWavr.

Esse desempenho pode ser devido não apenas às possíveis diferenças entre a perda de massa segundo a lei de Faraday e gravimétrica, mas também das tensões de tração aplicadas pela aplicação de carga de flexão, que podem aumentar a taxa de propagação da abertura de fissura. Na mesma referência, algumas outras vigas foram descarregadas, assim, os dados MCWavr vs x/r_0 seguem uma tendência similar à presente investigação, onde o prisma de concreto testado permaneceu descarregado durante a experimentação.

3.4 Correlação empírica entre taxa de corrosão de armadura e taxa de propagação de fissuras superficiais

A Figura 12 mostra a propagação da abertura da fissura em função do tempo de exposição. Como observado nesta figura, não há correlação entre a cobertura da armadura e a propagação de fissuras para essas amostras localizadas em La Voz, Venezuela, local de ensaio. Duas das fissuras em cada cobertura da armadura se comportaram na mesma faixa de abertura máxima de fissura (entre 0,05 e 0,3 mm), e apenas uma dessas fissuras apresentou maior abertura máxima (cerca de 0,4 mm e acima). As linhas de regressão para cada propagação de fissura também são mostradas

na Figura 12, mostrando a adequação acima de 0,8. A inclinação de tais linhas de regressão é considerada nesta investigação como a taxa de propagação de fissuras superficiais (SCPR em mm/mês).

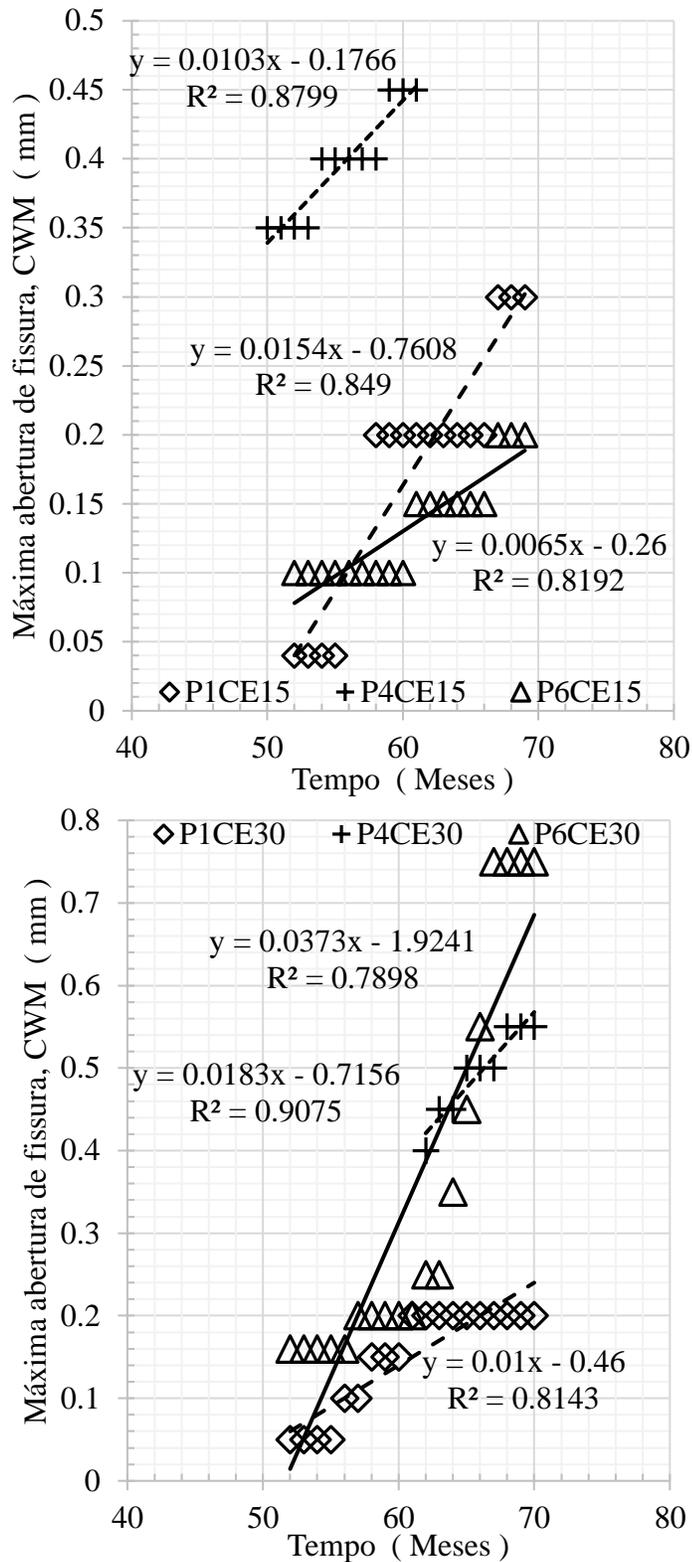


Figura 12. Pesquisa de propagação de fissura para a relação a/c 0,65, amostra de concreto 1, face de barlavento, La Voz, Venezuela, local de ensaio natural (a) Cobrimento de 15 mm e (b) cobrimento de 30mm.

Com base nos dados disponíveis até o momento, uma correlação empírica entre os resultados do SCPR e iCORR foi realizada e mostrada na Figura 13. Como observado a partir desta figura, não há uma diferença aparente entre a correlação para 15 mm e 30 mm. Após dados experimentais de outros prismas de concreto com relação a/c em La Voz, Venezuela, local de ensaio e outros prismas de corrosão ativa, quando fissuras apareceram no elemento de concreto, a taxa de abertura é diretamente proporcional à iCORR da armadura, que por sua vez é o óxido expansivo para produzir essas fissuras.

Esta correlação empírica ajudará a estabelecer uma estimativa indireta da taxa de corrosão do aço de armadura se os responsáveis pela manutenção da estrutura corroída não puderem ter equipamentos de ensaio para determinar tais valores eletroquímicos, e apenas uma pesquisa de abertura de fissura for realizada em um período de tempo de pelo menos um ano (12 meses).

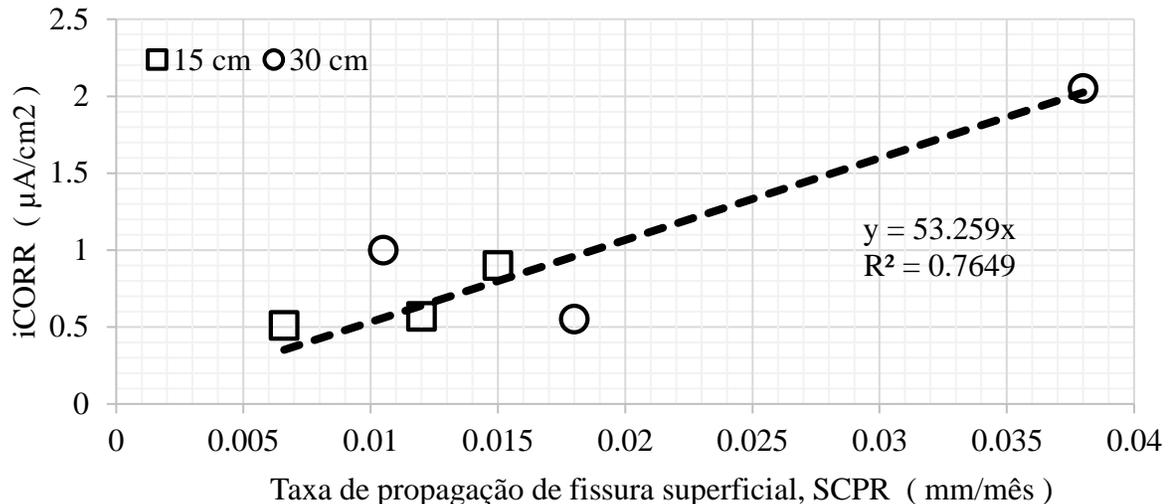


Figura 13. Correlação empírica entre SCPR e iCORR, prismas de concreto com relação a/c de 0,65, La Voz, Venezuela, local de ensaio natural

4. CONCLUSÕES

1. Uma excelente correlação entre a abertura máxima de fissura (MCWAVR) e a perda de diâmetro induzida por corrosão ($xAVG/r0$) (barras com 15 mm e 30 mm de cobrimento de concreto, nas faces de barlavento e sotavento, para amostras de relação a/c = 0,65) que pode ser usado para prever a perda da seção da armadura para uma dada abertura de fissura.
2. O declive da tendência MCWAVR vs $x/r0$ para dados de corrosão natural foi maior do que o obtido a partir de dados de corrosão acelerada. Isso pode reduzir o tempo para a reabilitação de elementos de concreto corroídos em estruturas naturalmente expostas no ambiente marinho.
3. Uma correlação empírica entre taxa de propagação de fissuras superficiais (SCPR) e iCORR foi estabelecida para prismas de a/c de 0,65 expostas a La Voz, Venezuela, que podem ajudar a estimar a iCORR indiretamente se os valores de MCWAVR do elemento corrosivo forem obtidos num período de pelo menos um ano.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao CYTED e à Universidad del Zulia pelo financiamento desta pesquisa, e todas as pessoas que ajudaram com o monitoramento da corrosão e da fissuração por um período tão longo de tempo, isso não teria sido possível sem elas; também ao Dr. Douglas Linares por ajudar na tradução do artigo.

6. REFERÊNCIAS

- 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)