

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

J. A. Briceño-Mena¹ , M. G. Balancán-Zapata¹ , P. Castro-Borges^{1*} 

* Autor de Contato: pcb1963@gmail.com

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

Recepção: 13/12/2019 | Aceitação: 24/04/2020 | Publicação: 30/04/2020

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/desp passivação durante a passivação, mas no processamento de dados. O processo de cura e armazenamento influenciou a tendência de desp passivação. O tipo de armazenamento pós-cura afetou a taxa de corrosão acumulada de 1 a 5 $\mu\text{A}^*\text{dia}/\text{cm}^2$; isso é equivalente à margem de incerteza na interpretação.

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

Citar como: Briceño-Mena, J. A., Balancán-Zapata, M. G., Castro-Borges, P. (2020), “Qualidade do processo de passivação em concreto armado: efeitos da periodicidade de polarização e parâmetros de consolidação de passivação no processamento de dados”, Revista ALCONPAT, 10 (2), pp. 243 – 258, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v10i2.466>.

¹ Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN, Unidad Mérida, km. 6 Ant. Carr. a Progreso, 97310 Mérida, Yucatán, 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, Merida, 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 primeiro número do ano 2021, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do terceiro número do ano de 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.

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

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.

1. INTRODUÇÃO

Em condições naturais, uma camada de óxidos que protege o aço da armadura é consolidada ao longo do tempo (Poursae & Hansson, 2007). Essa camada é formada devido à alta alcalinidade do concreto e é conhecida como camada de passivação (Andrade et al., 1995). Essa camada fornece uma barreira contra agentes agressivos, dos quais depende a estabilidade da qualidade da passivação. Portanto, quando as estruturas são expostas a um ambiente natural agressivo, o tempo de ocorrência e consolidação da passivação é muito importante, pois o comportamento eletroquímico do aço da armadura dependerá dele e, portanto, de seu processo de corrosão (Ahmad & Kumar, 2013), entendendo como consolidação a estabilidade eletroquímica da camada passiva. Existem estudos sobre a passivação da armadura, bem como os estágios de iniciação e propagação da corrosão (Andrade et al., 1995; Huet et al., 2005; Jiang et al., 2017). No entanto, os objetivos

desses estudos não levaram necessariamente em consideração o tempo adequado para o aço consolidar a passivação (Poursaei & Hansson, 2007).

Além disso, a variabilidade nos métodos de estudo da passivação (Alonso et al., 2000; Jiang et al., 2017; Page, 2009; Poursaei & Hansson, 2007) pode causar discrepância na interpretação dos mesmos, causando valores de superestimação ou subestimação. Dados sobre corrosão em concreto armado são comumente expressos como taxa de corrosão instantânea, i_{corr} , em função do tempo (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). Muitos estudos incluem a análise do comportamento i_{corr} da zona de passivação até o momento em que começa a exibir sinais claros de despassivação. Isso ajuda a avaliar a resistência à corrosão de diferentes materiais. Alguns trabalhos de ambos: antes do ano 2000 (Alonso et al., 2000; Andrade & Gonzalez, 1978; Lopez & Gonzalez, 1993) e após o ano 2000 (Ghods et al., 2009; Pech-Canul & Castro, 2002; Poursaei & Hansson, 2007), abordam os fenômenos que ocorrem antes da despassivação. No entanto, a limitação do uso de dados analógicos em estudos anteriores e a dispersão intrínseca dos dados i_{corr} atrasaram uma compreensão mais profunda das tendências i_{corr} na zona de passivação. Estudos anteriores (Andrade & Alonso, 1996; Castro-Borges et al., 2013, 2017; Melchers & Li, 2006; Pedrosa & Andrade, 2010; Rebolledo & Andrade, 2010) incluem análises de zona de passivação e alguns deles encontraram interpretações de tendências de dados aplicando um processamento matemático direto, o qual, obviamente, precisaria ser confirmado sob diferentes condições de exposição.

A prática atual de projetar estruturas de concreto armado com vida útil de quase cem anos implica a aplicação de critérios de durabilidade para evitar corrosão. Isso exige uma compreensão muito mais profunda da corrosão na zona de passivação. A estabilidade e durabilidade da zona de passivação requerem qualidade ótima do concreto (condições de cura, relação água/cimento), conhecimento do ambiente de exposição (ventos predominantes e não predominantes, regime de temperatura e umidade relativa) e medidas de prevenção de danos (cobrimento de concreto, revestimento superficial) entre outros fatores. Uma combinação inadequada destes em tenra idade pode afetar negativamente a qualidade da passivação e a vida útil futura. O estudo da qualidade da passivação no aço incorporado no concreto é vital, pois pode afetar significativamente o comportamento eletroquímico posterior e, conseqüentemente, a vida útil da estrutura a curto, médio e longo prazo.

No entanto, procedimentos de rotina para estudos de campo de longo prazo, com uma variedade de objetivos combinados e materiais diferentes, não permitem facilmente um estudo detalhado da qualidade da passivação em tenra idade e, portanto, o impacto dessa situação não é conhecido na vida útil do elemento. Um exemplo disso é geralmente quando as medições são realizadas no campo em intervalos de baixa periodicidade. Essa situação pode mascarar tendências que podem ser úteis para os modelos de vida útil. Por esses motivos, surgiram dúvidas após mais de dez anos de experimentação (a partir de 2007) em amostras de campo nas quais era esperado um processo de despassivação relativamente cedo, o que não ocorreu. Decidiu-se então, dez anos depois, outro conjunto de amostras (a partir de 2017), em que alguns parâmetros em sua composição e exposição seriam modificados para poder analisar com mais detalhes a qualidade da passivação.

Por outro lado, o estudo da qualidade da passivação requer conhecimento completo dos critérios gerais usados para definir uma barra da armadura como passiva, em transição ou ativa. O critério mais aceito é que a passivação termina quando a taxa de corrosão excede a faixa de 0,1 - 0,2 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ (Andrade & Gonzalez, 1978; Berke et al., 1996), embora alguns critérios amplamente utilizados incluam uma faixa de 0,1 - 0,5 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ (Andrade & Alonso, 1996; NMX-C-501-ONNCCE, 2015; Troconis et al., 1998). Para fins práticos, um critério conservador de valores $<0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ indica passividade na armadura de concreto. Considerando o exposto, o objetivo do presente estudo foi analisar a qualidade da passivação na armadura de concreto em termos de periodicidade de

polarização durante a medição, parâmetros de passivação e processamento de dados. Para este trabalho, apenas os dados correspondentes a uma cobertura de concreto de 20 mm são analisados, o que está mais relacionado à situação típica do concreto na região.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

2.1 Preparação da amostra

Utilizando o método de projeto do ACI (ACI 211-91, 2002), doze amostras prismáticas (150x150x300 mm) foram confeccionadas usando cimento Portland composto (CPC30R) padronizado pela norma mexicana (NMX-C-414-ONNCCE, 2014) e agregado de rochas calcárias típico do sudeste do México. A Tabela 1 mostra as características básicas do concreto: cura, condição de armazenamento, tipo de cimento e a relação água/cimento, e a Tabela 2, a dosagem do concreto. Cada amostra foi armada com seis barras de aço carbono classe 42 e 3/8" de diâmetro (350 mm de comprimento), colocadas em profundidades de 15, 20 e 30 mm. Antes da colocação nas amostras, a área de estudo era marcada em cada barra, deixando uma área livre de 150 mm de comprimento no centro. A barra restante foi pintada com tinta epóxi e sua extremidade coberta com fita isolante (Figura 1).

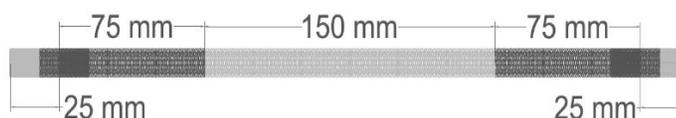


Figura 1. Marcação da área desprotegida de 150 mm no centro da barra (zona de estudo).

O concreto foi preparado com duas relações água/cimento (w/c): 0,45 (considerado concreto de alta qualidade na área de estudo) e 0,65 (considerado como baixa qualidade). Seis amostras (amostras antigas - 2007) foram curadas em uma câmara úmida por 28 dias e depois mantidas em armazenamento por 233 dias. O segundo conjunto de seis (novas amostras - 2017), foi curado por sete dias por aplicação direta de água da torneira, prática comum na área de estudo e mantido em armazenamento por 27 dias.

Tabela 1. Características básicas do tipo de concreto, cura e armazenamento

Amostra	Processo de cura	Condição de armazenamento (sem controle de temperatura e umidade relativa)	Tipo de cimento	Relação água/cimento
2007	Câmara de cura por 28 dias	Mantido em armazenamento semi-controlado por 233 dias após a cura	Cimento Portland Composto (CPC30R)	0.45 (3 amostras) 0.65 (3 amostras)
2017	Água da torneira direta, algumas vezes/dia por 7 dias	Mantido em armazenamento semi-controlado por 27 dias após a cura		0.45 (3 amostras) 0.65 (3 amostras)

Tabela 2. Traços dos concretos

Amostra	Relação w/c	Consumo de material (kg/m ³)				f'c - 28 dias (kg/cm ²)
		cimento	areia	brita	água	
2007	0.45	408	681	800	287	N/A
	0.65	277	739	868	280	N/A
2017	0.45	456	638	757	205	231
	0.65	315	740	757	205	159

Antes da exposição, os lados inferior e superior das amostras foram pintados com tinta epóxi para limitar a influência de agentes agressivos nas faces laterais (Figura 2).

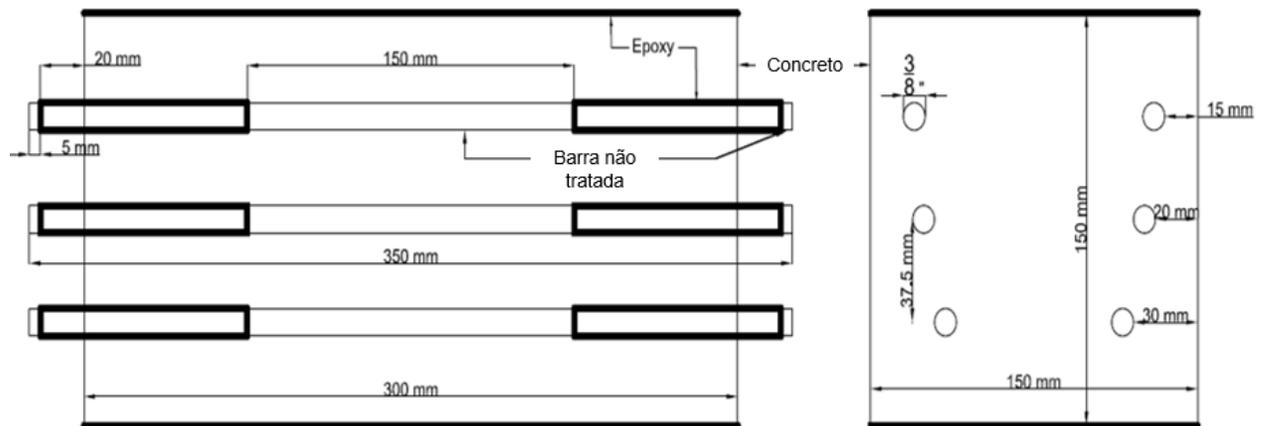


Figura 2. Configuração da amostra

2.2 Ambiente de exposição

As amostras foram expostas em um ambiente tropical marinho na costa norte da Península de Yucatan, no México. Eles foram colocados na praia a 50 m da beira-mar e 0,95 m acima da superfície do solo, posicionando a área com maior cobertura na parte inferior da amostra. Sua orientação era tal que eram expostos a diferentes condições climáticas regionais: ventos predominantes fora do nordeste (PW) e ventos não predominantes vindos do sudoeste (NPW) (Figura 3). O primeiro conjunto de amostras (2007) foi exposto 261 dias após a moldagem e o segundo conjunto (2017) 34 dias após a moldagem.

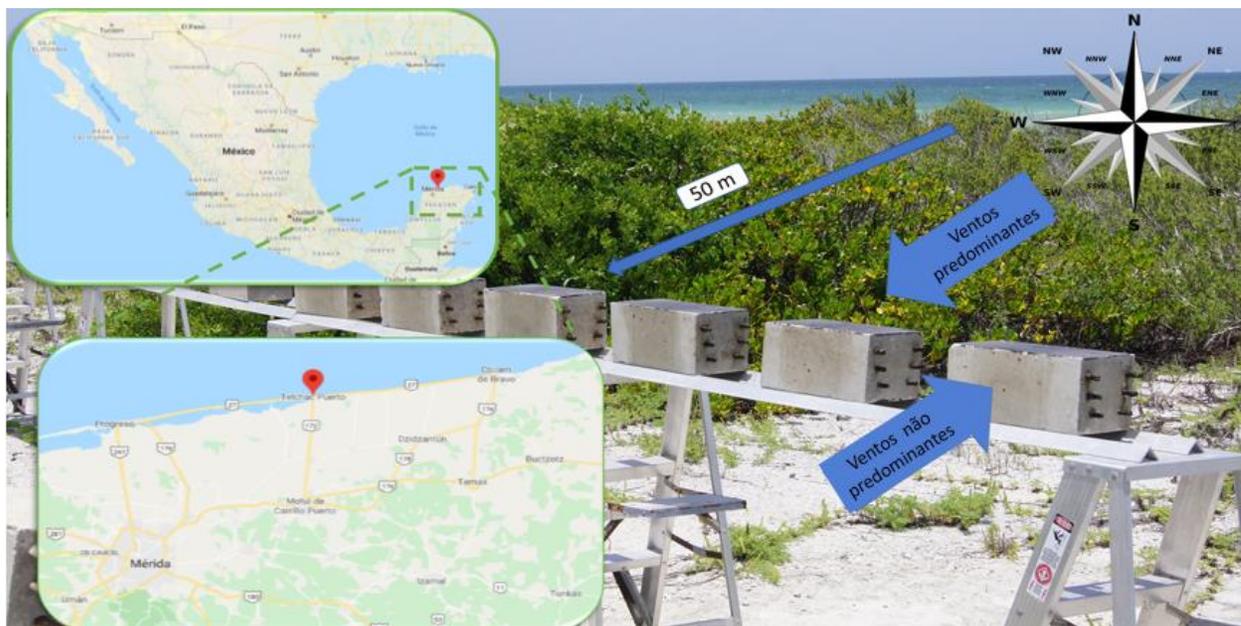


Figura 3. Configuração da estação para exposição das amostras.

2.3 Medições de corrosão

A taxa de corrosão da armadura de aço (i_{corr} , $\mu\text{A}/\text{cm}^2$), potencial (E_{corr} , mV vs. Cu/CuSO₄) e resistência elétrica do concreto (R_s , k Ω) foram medidas com um corrosímetro portátil comercial com sistema de confinamento, que utiliza a técnica de resistência de polarização linear (R_p) (Andrade & Alonso, 1996). O valor da resistividade elétrica (ρ , k Ω -cm) foi calculado com a equação (1), onde D é o diâmetro da barra em cm.

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

Para as amostras de 2007, as medições eletroquímicas foram realizadas aproximadamente a cada 90 dias, durante 557 dias, enquanto no segundo conjunto, 2017, foram realizadas a cada 14 dias, durante 279 dias.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Qualidade de passivação em idades iniciais

Para os presentes propósitos, a idade inicial é definida como o tempo durante o qual as amostras exibiram comportamento eletroquímico na zona de passivação. A interpretação dos dados da zona de passivação foi facilitada pelo uso de um valor limite conservador de $0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ com uma faixa de $0,1 - 0,5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ para a despassivação. A Figura 4 é um gráfico típico usado para registro i_{corr} versus tempo em pequenas amostras expostas a um ambiente marinho natural em diferentes estações do ano. Embora três cobrimentos de concreto (15 mm, 20 mm e 30 mm) tenham sido estudados, este trabalho discute apenas dados para a cobertura de concreto de 20 mm. Esse é muito comum na zona marinha da região, embora as normas aplicáveis exijam um cobrimento mais espesso (NMX-C-530-ONNCCE, 2017). Outras variáveis foram a orientação da amostra (PW e NPW), incluída para identificar qualquer efeito do vento e a qualidade do concreto (w/c 0,45 e 0,65).

Nas amostras de concreto de alta qualidade (w/c 0,45), foram coletados dois tipos de dados, um para exposição iniciada em 2007 (Tabela 1 e Figura 4.a) e outro a partir de 2017 (Tabela 1 e Figura 4.b). O parâmetro de qualidade semelhante entre as amostras foi determinado principalmente pelo

tipo de cimento e pela razão w/c. Isso ocorreu devido à falta de mais informações em 2007. No entanto, uma maneira de minimizar a variabilidade do CPC foi comparando elementos da mesma família (2007 ou 2017), onde a diferença entre os elementos era mais perceptível, da mesma família, devido a fatores mais importantes, como cura e armazenamento. De fato, os dados para exposição desde 2007 (Figura 4.a) foram essencialmente estáveis durante os primeiros 557 dias. Os primeiros 233 dias corresponderam ao armazenamento em ambiente semi-controlado. Do dia 233 ao dia 557, eles foram expostos a um ambiente marinho tropical, mas a condição de passivação continuou quase inalterada.

Por outro lado, os dados para a exposição 2017 (Figura 4.b), correspondentes a 27 dias em condições de laboratório e 211 dias de exposição natural, começaram a mostrar diferenças entre PW e NPW. Esses números confirmam uma diferença entre as duas qualidades de passivação, devido principalmente ao processo adequado de cura e armazenamento de amostras por 233 dias no ambiente não agressivo, sem agentes agressivos, para amostras de 2007. Portanto, a qualidade da passivação nas idades iniciais, permitiu um melhor comportamento eletroquímico instantâneo subsequente para 2007 (Figura 4.a) do que para as amostras de 2017 (Figura 4.b). A resposta do concreto de baixa qualidade (w/c 0,65) foi semelhante à do concreto de alta qualidade (w/c 0,45) para 2007 (Figura 4.c) e 2017 (Figura 4.d). No entanto, os dados instantâneos para ambas as proporções w/c parecem ser um pouco diferentes em 2017.

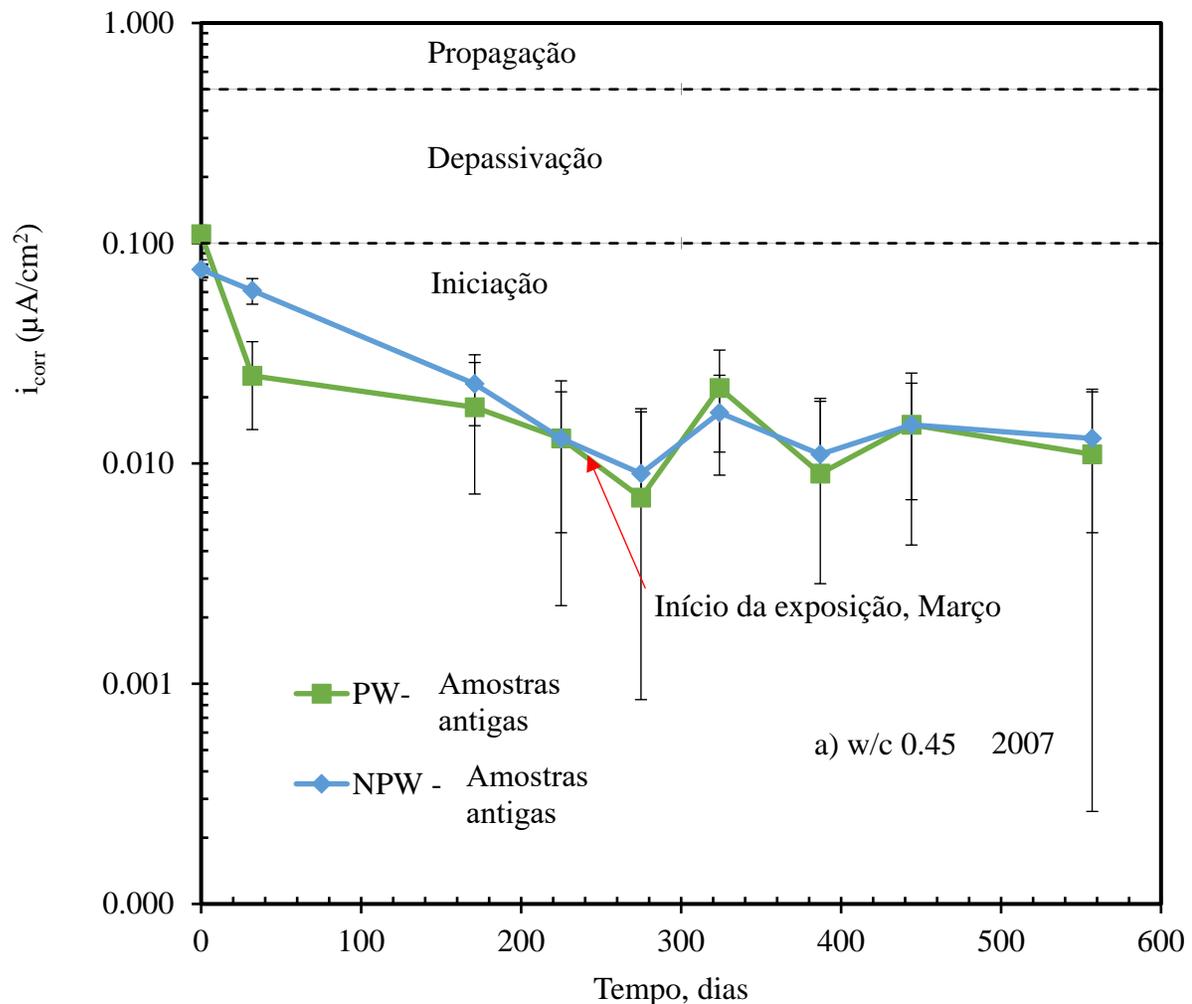
Embora o comportamento da zona de passivação tenha sido estável, ainda havia dúvidas se havia momentos em que, em resposta às mudanças de estação (chuvosa e seca), a taxa de corrosão poderia ter excedido os valores da zona de passivação. Como parte de um projeto maior, as amostras foram moldadas e expostas em 2017 para outros fins, mas claramente poderiam servir para verificar se isso poderia influenciar a taxa de corrosão cumulativa (i_{cum}), conforme relatado recentemente (Castro-Borges et al., 2013, 2017; Melchers & Li, 2006; Pedrosa & Andrade, 2010; Rebolledo & Andrade, 2010). Ao contrário dos incorporados em 2007, esses novos foram expostos ao ambiente marinho quase imediatamente após a cura. Em uma comparação dos dois processos na mesma escala de tempo (Figuras 4.a a 4.d), as amostras mais recentes exibiram comportamento mais próximo da zona de despassivação do que as amostras mais antigas para todas as variáveis estudadas. As variáveis de cura, armazenamento e ambiente afetaram, em maior ou menor grau, a tendência à despassivação. Os parâmetros medidos aqui ajudaram a confirmar a qualidade do processo de passivação nas idades iniciais, independentemente das variáveis dependentes (ou seja, w/c e orientação). Isso afetará a vida útil planejada da amostra em termos de despassivação e propagação.

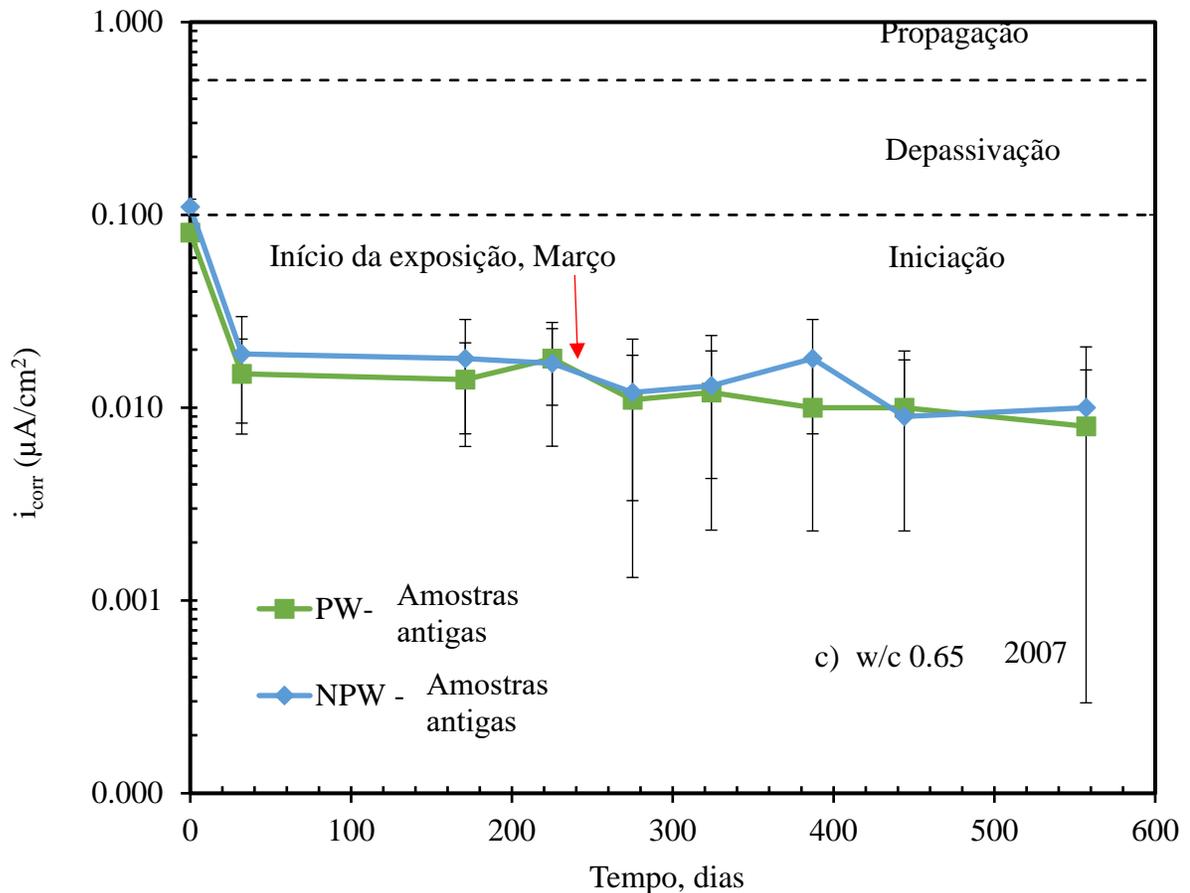
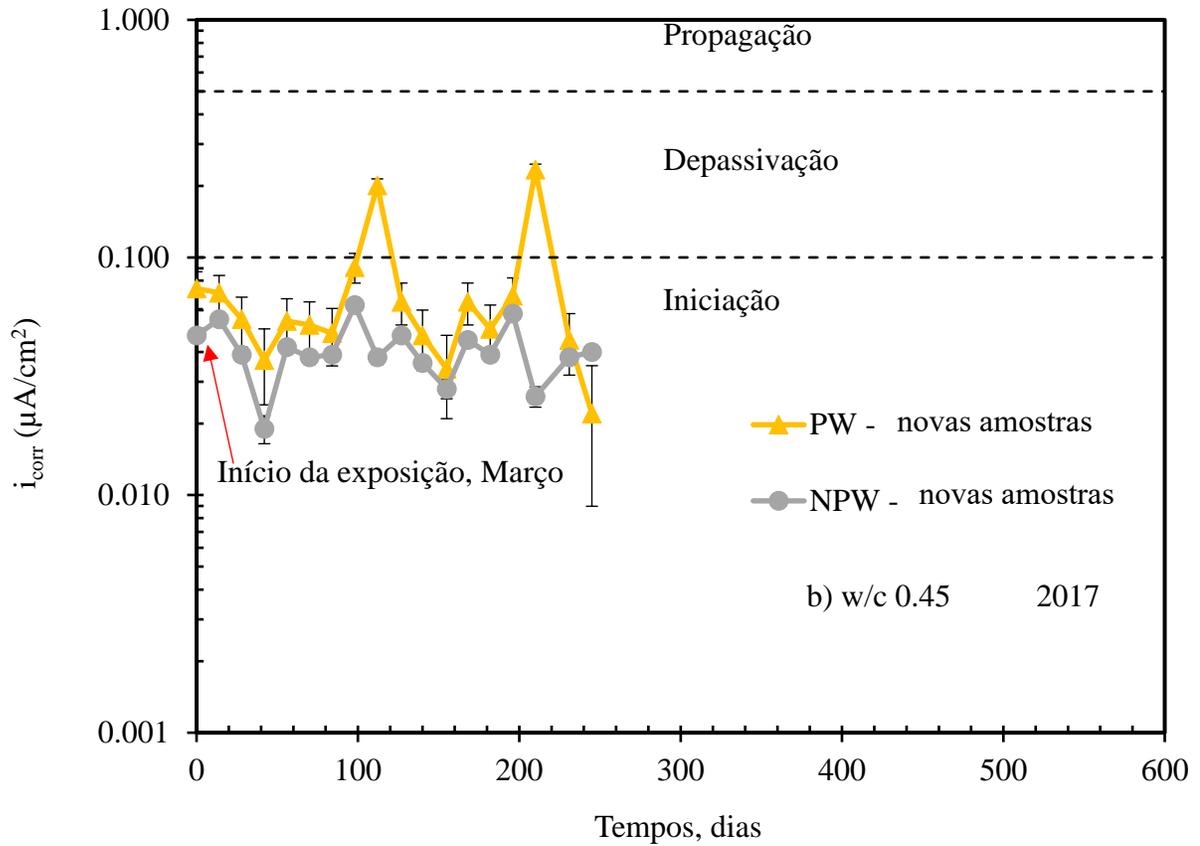
3.2 Efeitos da periodicidade da medição eletroquímica no processamento de dados

Uma preocupação óbvia ao realizar medições eletroquímicas frequentes na armadura de aço passivo no concreto é a possível polarização prejudicial que pode afetar o valor real do i_{corr} . Nos tempos modernos, a polarização prejudicial é controlada, por exemplo, medindo o i_{corr} através da resistência de polarização linear com taxas de varredura da ordem de centésimos de milivolts e com polarização catódica próxima de no máximo 20 mV. Portanto, e dentro dessas faixas, uma maior periodicidade de medição nas polarizações para medir a corrosão não é prejudicial para a barra estudada, e especialmente em ensaios de campo. Esse assunto geral foi abordado extensivamente, mas nenhum estudo anterior (Andrade & Gonzalez, 1978; Andrade et al, 1986; Clément et al, 2012; Hansson et al, 2012) contém informações sobre o possível efeito da periodicidade das medidas a serem realizadas. Interpretar o significado do i_{cum} em condições naturais. A diferença mais óbvia entre os estudos de laboratório e de campo é que, em condições de laboratório, os intervalos de medição podem ser minutos, enquanto em condições naturais os intervalos são normalmente da ordem dos dias.

O possível efeito da periodicidade de polarização em idades iniciais na corrosão cumulativa pode

ocorrer em um ambiente natural em resposta a picos de temperatura e umidade, o que permitiria interpretar com mais precisão as mudanças nas tendências observadas. Portanto, determinar se a periodicidade da medição eletroquímica influencia a interpretação de passivação / despassivação em concreto armado com i_{cum} em ambiente natural durante o estágio de iniciação (zona de passivação) é, portanto, bastante técnica e economicamente importante. O i_{corr} confirma que a periodicidade da medição nas amostras mais antigas ou mais recentes não afetou a credibilidade dos dados, pois as duas séries de amostras exibiram as mesmas tendências (Figura 4). Entretanto, ao usar o i_{cum} , a periodicidade da medição eletroquímica pode criar diferenças entre tendências que, se conhecidas, podem ser equivalentes aos níveis de tolerância usados em ensaios destrutivos, como aqueles usados para comparar perdas eletroquímicas com perdas gravimétricas (Andrade & Martinez, 2005). Para aproximar essas diferenças, os dados da Figura 4 foram analisados, resultando nos dados da Figura 5.





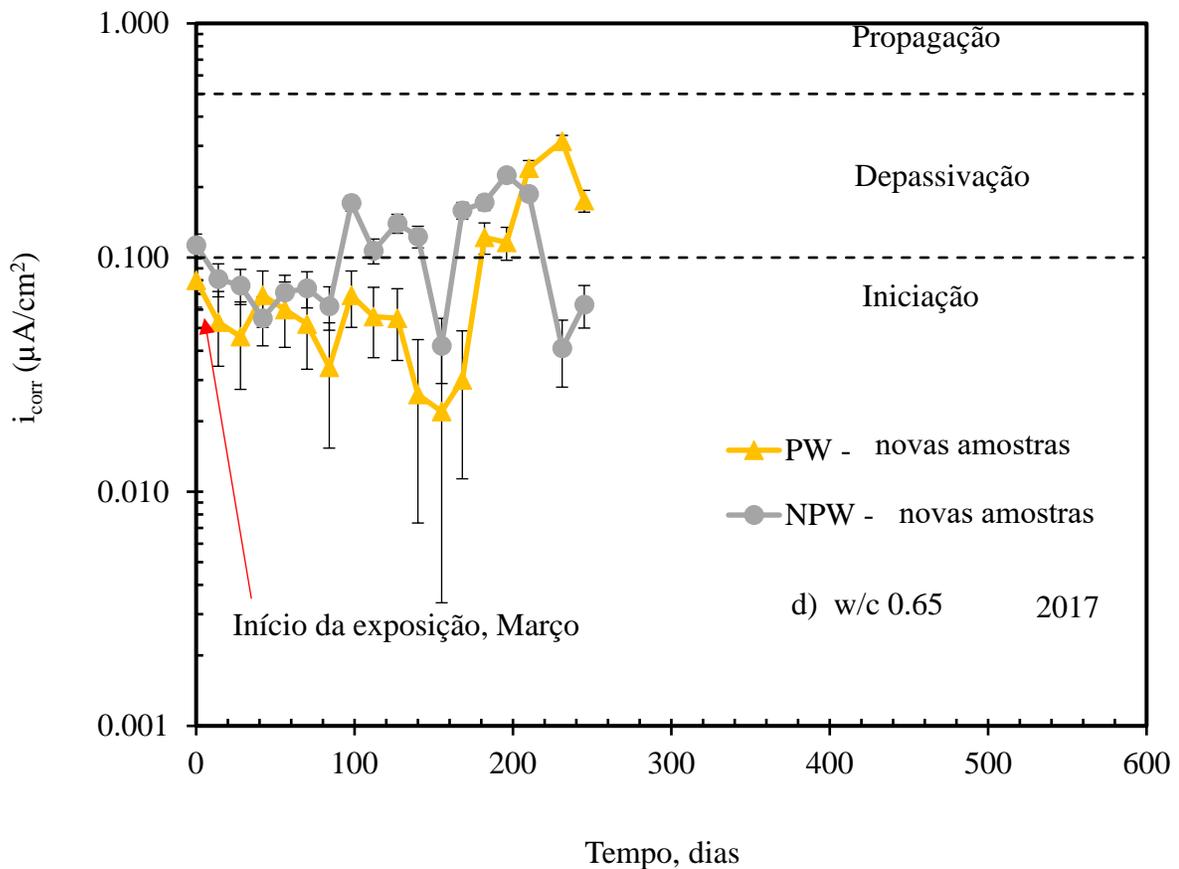


Figura 4. Taxa de corrosão instantânea versus tempo: a) w/c 0.45, março de 2007; b) w/c 0.45, março de 2017; c) w/c 0.65, março de 2007; d) w/c 0.65, março de 2017.

A Figura 5 mostra uma relação entre dezesseis medidas de março de 2017 e quatro medidas de março de 2007 que correspondem, em ambos os casos, a um período de exposição de 211 dias logo após o início da exposição ao meio ambiente. Essa relação $16/4 = 4/1$ foi tomada como referência para discutir o efeito da periodicidade da medição na interpretação do i_{cum} . O termo i_{cum} pode ser definido como a soma das taxas de corrosão anteriores em cada período específico (Castro-Borges et al., 2013), conforme dado pela equação (2):

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

Onde:

t_f = último dia do período considerado

t_i = dia inicial do período considerado

i_{corrf} = i_{corr} final do período considerado

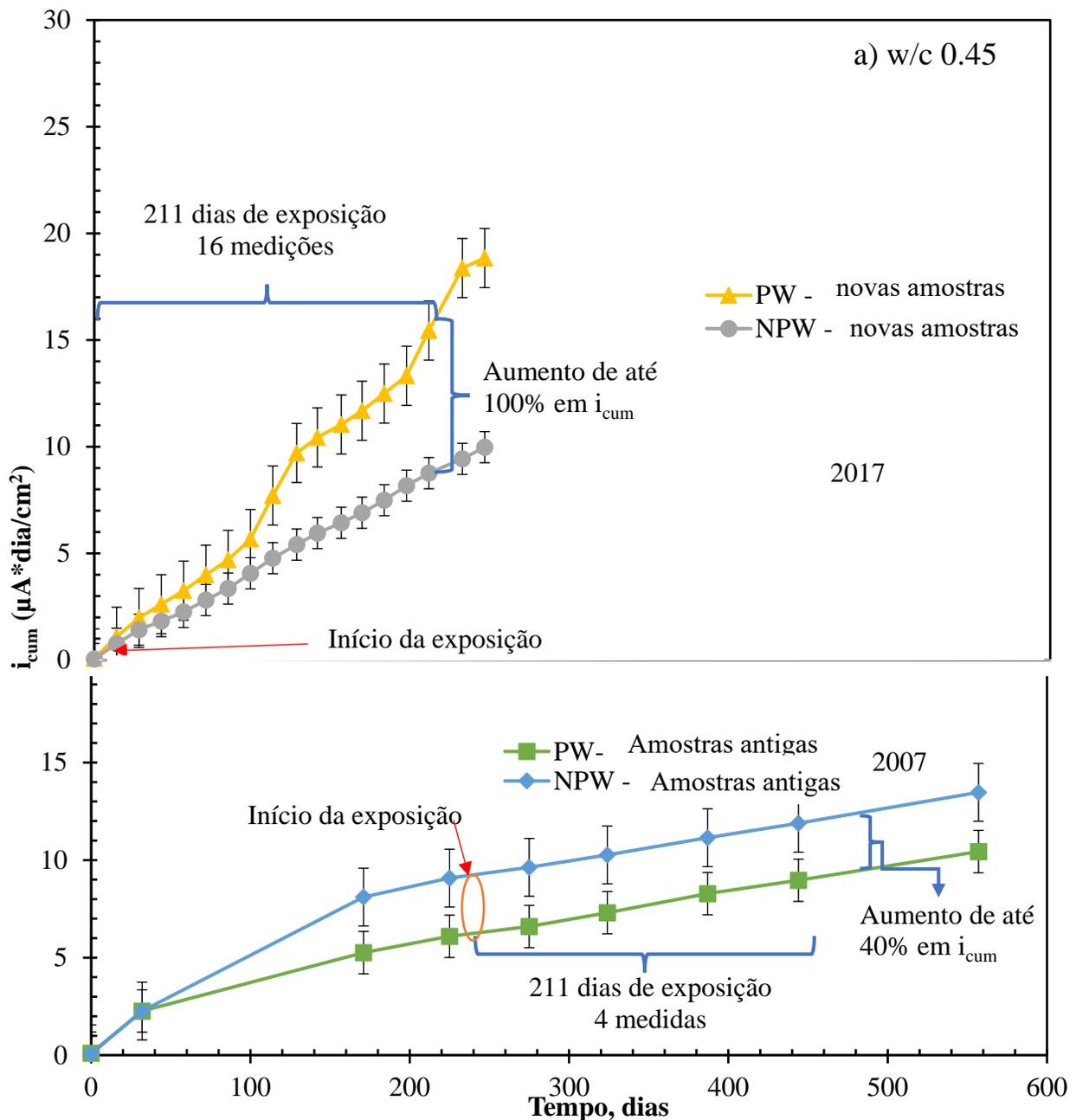
i_{corri} = i_{corr} inicial do período considerado

i_{cum_i} = Taxa de corrosão anteriormente acumulada

Quando os dados da Figura 5 foram analisados usando uma razão de periodicidade de medição eletroquímica de 4/1, a diferença entre PW e NPW foi de até 100% no valor de i_{cum} em amostras que não tiveram tempo para consolidar sua passivação corretamente (2017). Além disso, as tendências entre PW e NPW foram invertidas ao considerar a qualidade do concreto (w/c 0,45 ou 0,65). Isso coincide e pode ser comparado com a tolerância devido a erros atribuídos à coleta de dados quando as perdas eletroquímicas são comparadas às perdas gravimétricas (Andrade & Martinez, 2005). No entanto, isso não aconteceu com aqueles (2007) que foram armazenados por

233 dias e expostos por 211 dias, e que influenciaram o i_{cum} entre PW e NPW em até 40%. Nesse caso, pode significar a possibilidade de uma tolerância mais acentuada se as perdas eletroquímicas forem comparadas às gravimétricas.

Os valores de 100% e 40% provavelmente significam uma diferença característica entre amostras com passivação não consolidada ou consolidada imediatamente antes do início do estágio de despassivação para a razão 4/1 da periodicidade de medição. As limitações experimentais e de coleta de dados podem influenciar levemente os resultados, portanto não se aplicam necessariamente em condições diferentes das relatadas neste trabalho. De forma equivalente, se taxas de medição > 4/1 fossem encontradas e apresentassem diferenças numéricas ainda mais altas na corrosão cumulativa, a credibilidade dos dados seria questionada nas idades iniciais (zona de passivação). Isso é corroborado pelo fato de que os valores de i_{corr} (Figura 4) começam a mostrar valores-limite próximos de $0,1 \mu A/cm^2$, a 100% de tolerância ao comparar perdas eletroquímicas x gravimétricas e a posição invertida das tendências de PW e NPW em Figura 5.



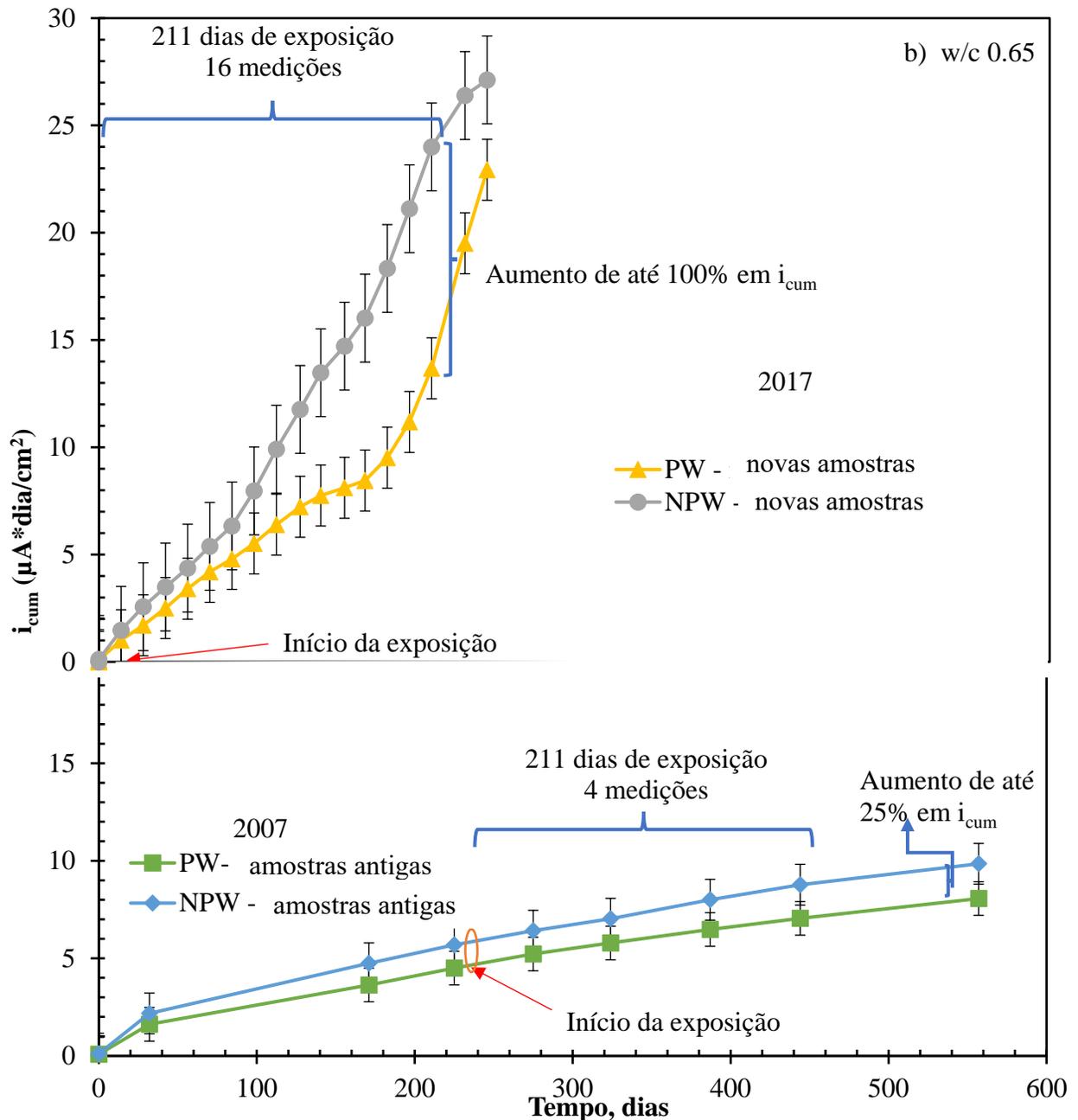


Figura 5. Taxa de corrosão cumulativa versus tempo: a) w/c 0.45; b) w/c 0.65.

3.3 Margem de incerteza na corrosão acumulativa

Na Figura 6, o i_{cum} das amostras moldadas em 2007 corresponde ao momento imediatamente anterior à exposição ao ambiente marinho tropical. Essas amostras ficaram em condições semi-controladas (armazenamento em laboratório, protegidas da chuva e do sol e sem controle da umidade e temperatura relativa) durante todo o período. Não foram observadas variações significativas em uma periodicidade de medição de aproximadamente três meses (Figura 4). Considerando que eram eletroquimicamente estáveis na zona de passivação, a corrosão cumulativa imediatamente antes da exposição ao ambiente natural diferia entre as superfícies (PW e NPW), de $1 \mu A \cdot dia/cm^2$ para $w/c = 0,65$ a $5 \mu A \cdot dia/cm^2$ para $w/c = 0,45$. Ahmad (2003) menciona que quanto menor o teor de cimento, menor a consistência plástica na mistura, o que faz com que a passivação do aço não ocorra uniformemente, resultando na despassivação; portanto, os resultados encontrados podem representar a margem de incerteza na interpretação do i_{cum} nas idades iniciais

(zona de passivação) e essas diferenças ($1 \mu\text{A}\cdot\text{dia}/\text{cm}^2$ para $w/c = 0,65$ a $5 \mu\text{A}\cdot\text{dia}/\text{cm}^2$ para $w/c = 0,45$) podem consideradas características dos materiais utilizados.

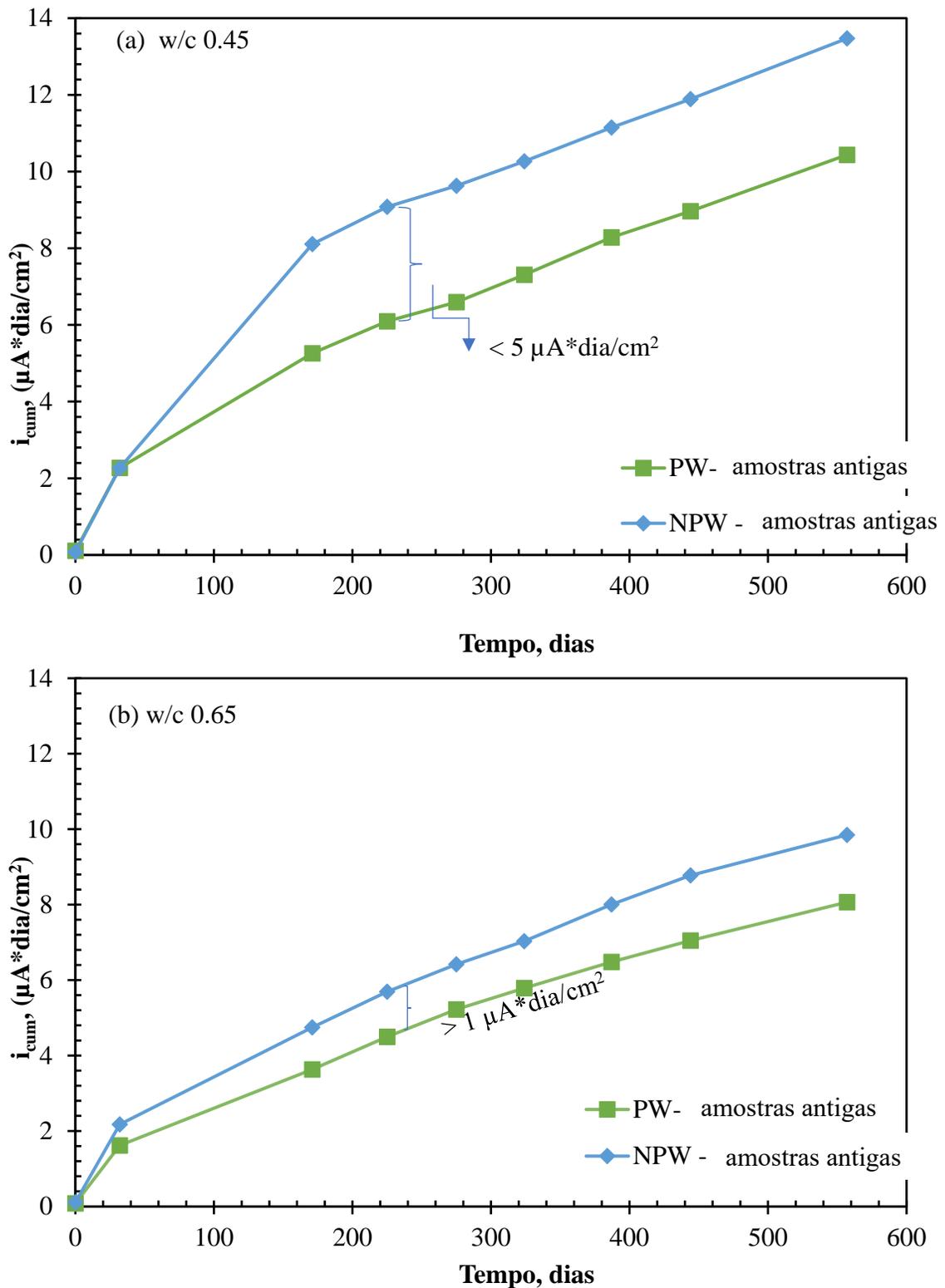


Figura 6. Incerteza na taxa de corrosão acumulada versus tempo: a) w/c 0.45; b) w/c 0.65.

4. CONCLUSÕES

Os resultados relatados se aplicam a essas condições específicas do estudo. Portanto, eles podem ser extrapolados, tomando as precauções apropriadas para outras situações. Nos presentes dados, os parâmetros usados na consolidação da qualidade da passivação em idades iniciais (ou seja, variáveis de cura, armazenamento e ambientais) afetam a tendência à despassivação, independentemente das variáveis dependentes (razão w/c e orientação). Isso pode afetar a vida útil planejada.

Como e esperado, a polarização produzida pela periodicidade da medição eletroquímica (dias) em um ambiente marinho tropical não influenciou a passivação / despassivação do concreto armado durante o estágio de iniciação (zona de passivação).

Quando a periodicidade da medição eletroquímica foi calculada na proporção 4/1, verificou-se que ela poderia influenciar numericamente o valor acumulado da corrosão em até 100%. Isso é equivalente à tolerância usada em ensaios destrutivos comparando perdas eletroquímicas com perdas gravimétricas.

Embora seja considerado um método amplamente qualitativo, o i_{cum} permite a detecção de alterações no comportamento eletroquímico do concreto armado no estágio de iniciação (passivação). Do ponto de vista quantitativo, o tipo de armazenamento após a cura e antes da exposição ao ambiente, mesmo no estágio inicial (antes da despassivação), teve uma influência que diferiu de $1 \mu A \cdot dia/cm^2$ para $w/c = 0,65$ a $5 \mu A \cdot dia/cm^2$ para $w/c = 0,45$ em i_{cum} . Isso é equivalente à margem de incerteza na interpretação da corrosão cumulativa nas qualidades de concreto estudadas.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CINVESTAV-IPN Unidad Mérida e CONACyT pelo apoio parcial. Um dos autores, Jorge Briceño-Mena, deseja reconhecer sua bolsa de estudos do CONACyT por seus estudos de doutorado.

6. REFERÊNCIAS

- 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>
- Poursaee, 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.