

Efeito do ânodo incipiente em reparos localizados utilizando argamassas com sílica de casca de arroz (SCA) sobre substrato contaminado por cloretos

Effect of the incipient anode in concrete patch repair using mortars with rice husk ash (RHA) on substrate contaminated by chlorides

Paulo Augusto Daschevi 

Marcelo Henrique Farias de Medeiros 

Resumo

Após a realização de reparos localizados, costuma-se observar o ressurgimento de pontos de corrosão na região adjacente à área reparada, situação usualmente denominada ânodo incipiente. Embora tenham sido feitas diversas pesquisas a respeito do tema, ainda restam controversos aspectos em relação às suas causas, localização e progressão no tempo. Com objetivo de investigar essas lacunas no conhecimento, moldaram-se amostras com substrato contaminado por cloretos não reparadas e reparadas com argamassa de reparo contendo substituição de ligante por sílica de casca de arroz (SCA) nos teores de 0%, 10% e 20%. Em seguida, realizaram-se aferições das variáveis eletroquímicas de densidade e potencial de corrosão, bem como a inspeção destrutiva de parte das amostras. Após as aferições, observou-se aumento nas densidades de corrosão após o reparo, na interface substrato-reparo. Na inspeção destrutiva, também foi constatada deterioração significativa na interface reparo-substrato, bem como em algumas regiões no interior do substrato. Em relação ao efeito da substituição de ligante por SCA, não foi identificada redução relevante do ânodo incipiente nas argamassas com 10% e 20% de SCA. Por outro lado, notou-se possível redução da capacidade de passivação da argamassa com teor de 20% de SCA.

Palavras-chave: Ânodo incipiente. Reparo localizado. Cinza de casca de arroz.

Abstract

After performing localized repairs, it is customary to observe the reappearance of corrosion points in the region adjacent to the repaired area, a situation usually called the incipient anode phenomenon. Although there are several studies have on the subject, there are still controversial aspects regarding its causes, location, and progression over time. To investigate these gaps in knowledge, samples were molded with unrepaired chloride-contaminated substrate and repaired with repair mortar containing 0%, 10%, and 20% binder replacement with rice husk ash (RHA). Then, measurements of the electrochemical variables of density and corrosion potential were carried out, as well as the destructive inspection of part of the samples. After the measurements, an increase in corrosion rates was observed after the repair, in the repair-substrate interface. In the destructive inspection, significant deterioration also was observed in the repair-substrate interface region, as well as inside the substrate. Regarding the effect of replacing the binder with RHA, no relevant reduction in the incipient anode was identified in the mortars with 10% and 20% RHA. On the other hand, a possible reduction in the passivation capacity of mortar with 20% RHA content was noted.

Keywords: Incipient anode. Patch repair. Rice husk ash.

¹Paulo Augusto Daschevi

¹Universidade Federal do Paraná
Curitiba - PR - Brasil

²Marcelo Henrique Farias de Medeiros

²Universidade Federal do Paraná
Curitiba - PR - Brasil

Recebido em 10/09/22

Aceito em 07/09/23

Introdução

Esgotado o tempo de vida útil das estruturas de concreto armado, intervenções são necessárias para o reestabelecimento de seu desempenho e segurança. Ações de recuperação podem também ser aplicáveis antes mesmo desse período, quando as construções são mal executadas ou submetidas a condições para as quais não foram projetadas. Para tanto, diversas técnicas de reabilitação podem ser empregadas. Quando o objetivo é retomar as condições de passivação de armaduras do concreto armado e interromper a reação anódica em curso, destaca-se a execução de reparos localizados (Zhang; Mailvaganam, 2006), em virtude da facilidade de realização, baixo custo e aparente efetividade em deter o processo corrosivo que esteja em desenvolvimento.

No entanto, nas últimas décadas, têm sido constatados reiterados insucessos na realização dos reparos (Gulikers, 1989; Raupach, 1996; Wang; Helene; Monteiro, 2006; Ribeiro; Panossian; Selmo, 2013; Christodoulou *et al.*, 2014). Em geral, os pesquisadores indicavam a ocorrência de pontos de corrosão próximos a interface da região anteriormente reparada pouco tempo depois de sua execução, com as primeiras constatações atribuídas a Page e Treadway em 1982 (Christodoulou *et al.*, 2013). A essa deterioração prematura em reparos convencionou-se dar o nome de inversão de polaridade, ânodo incipiente, efeito halo ou efeito ânodo circular (Medeiros, 2002; Barkey, 2004; Soleimani *et al.*, 2010; Medeiros; Daschevi; Araújo, 2022).

As pesquisas buscaram, então, mapear as incompatibilidades físicas, químicas e eletroquímicas entre o substrato e o sistema de reparo (Raupach, 1996; Schießl; Breit; Raupach, 1994), as quais eram entendidas como possíveis fatores que deflagravam ou agravavam o ânodo incipiente. Paralelamente, técnicas para monitoramento foram desenvolvidas, com o que foi possível acompanhar em tempo real o processo corrosivo das armaduras (Andrade; Alonso, 1996) e, conseqüentemente, entender melhor os mecanismos de deterioração envolvidos. Além disso, critérios de projeto foram propostos com o objetivo de mitigar os efeitos do ânodo incipiente e adequar os projetos às condições a que se submeteriam os reparos (Ali *et al.*, 2018; Ribeiro; Panossian; Selmo, 2013).

Por outro lado, ainda que avanços significativos tenham sido feitos, restam aspectos controversos nos resultados apresentados pelas pesquisas, essencialmente quanto às causas, localização e progressão no tempo do ânodo incipiente. Conforme se demonstrará a seguir, existe uma diversidade de resultados e arranjos experimentais utilizados (Andrade; Castro; Pazini, 2021) que, por sua vez, conduzem a variadas conclusões. Ressalta-se que, em face dessas divergências, torna-se mais difícil a especificação de soluções efetivas que garantam a durabilidade dos reparos.

Nesse contexto, com o objetivo de aprofundar as investigações a respeito do ânodo incipiente, a respeito das causas mais prováveis envolvidas no fenômeno, da localização e progressão no tempo das deteriorações significativas, bem como do comportamento das diferentes argamassas de reparo utilizadas na pesquisa, propõe-se este estudo experimental, mediante a avaliação de diferentes substratos, argamassas de reparo e monitoramento das taxas de corrosão.

Referencial teórico

Reparos localizados e o ânodo incipiente

A proteção das armaduras pelo concreto baseia-se na sua capacidade de promover um ambiente alcalino e possibilitar a formação de uma película passivadora (Gonzalez *et al.*, 1996; Bentur; Berke; Diamond, 1997; Duarte *et al.*, 2014) que, por sua vez, impede a ocorrência do processo de corrosão, ainda que haja heterogeneidades que pudessem deflagrá-lo. No entanto, quando da ocorrência de carbonatação, contaminação por cloretos ou mesmo deterioração física, o concreto perde essa capacidade protetiva e a armadura passa a estar sujeita ao mecanismo deletério da corrosão (Raupach, 1996; Cascudo; Carasek, 2011; Medeiros *et al.*, 2012, 2013; Medeiros-Junior *et al.*, 2015; Ali *et al.*, 2018; Balestra *et al.*, 2019), com formação de produtos expansivos e retroalimentação do processo.

Diante disso, a técnica do reparo localizado mostra-se como uma solução econômica e eficaz para restauração de estruturas de concreto armado. Ela baseia-se na repassivação das armaduras por meio da substituição do concreto degradado por uma argamassa ou graute de reparo. Esse novo material, por sua vez, voltará a oferecer ambiente alcalino e proteção mecânica para formação e estabilização da película protetora das armaduras, com conseqüente interrupção do processo anódico (Zhang; Mailvaganam, 2006). Além disso, outras técnicas podem ser aplicadas paralelamente, como repassivação, inibição, aplicação de barreiras e proteção catódica (Helene, 1993; Souza *et al.*, 2017; Réus; Medeiros, 2020).

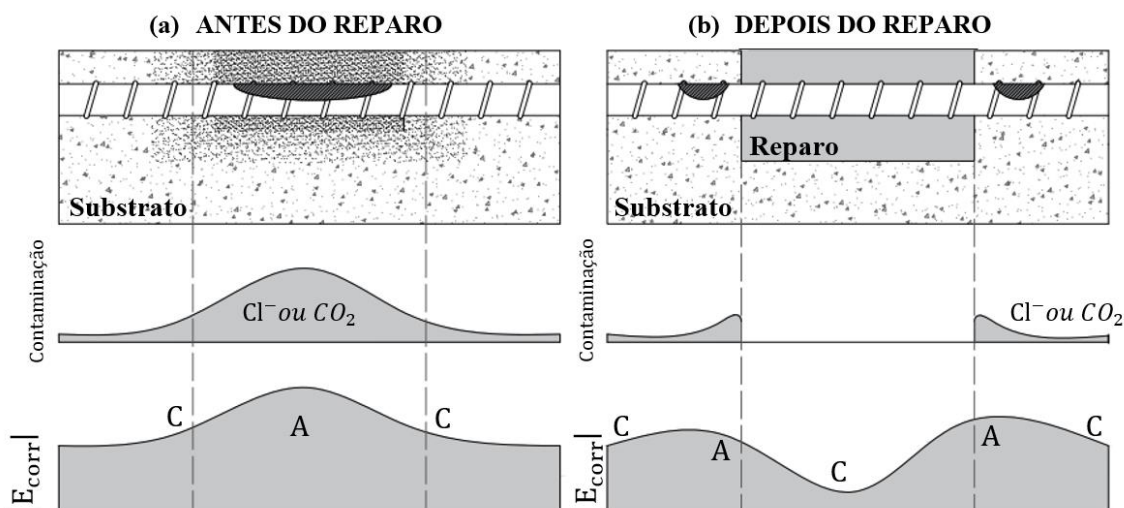
Os reparos localizados, em geral, são realizados nas seguintes etapas: escoramento da estrutura; remoção completa do concreto deteriorado; limpeza cuidadosa das barras, para remoção dos produtos de corrosão aderidos; aplicação eventual de ponte de aderência; aplicação eventual de proteção de superfície na barra (imprimação), como epóxi ou primer base zinco; aplicação da argamassa, graute ou concreto de reparo para reconstituição da seção; aplicação eventual de proteção de superfície sobre a área reparada; e acabamento, se necessário (Helene, 1992; Emmons; Vaysburd, 1996; Castro *et al.*, 2003; Christodoulou *et al.*, 2014).

No entanto, conforme já explanado, alguns pesquisadores passaram a notar que, após a repassivação na região do reparo, surgia um novo foco de corrosão próximo à interface substrato-reparo (Figura 1). Chamava a atenção o fato de que os danos precoces apareciam mesmo quando o reparo era feito rigorosamente de acordo com as práticas recomendadas pela literatura técnica (Barkey, 2004; Tilly; Jacobs, 2007; Kamde *et al.*, 2021; Krishnan *et al.*, 2021). Desse modo, seja por má execução ou surgimento de mecanismos de deterioração desconhecidos, os reparos tinham de ser refeitos poucos anos após sua execução, ocasionando retrabalhos, desconfiança dos usuários e desperdício de recursos financeiros.

Três causas são usualmente atribuídas ao ânodo incipiente. A primeira delas é a incompatibilidade, que consiste na diferença de potencial de eletrodo entre o material de reparo e o substrato, com a consequente formação de uma macrocélula de corrosão (Ali *et al.*, 2018; Ribeiro; Panossian; Selmo, 2013). A segunda possível causa decorre de fissuras, que geram caminhos preferenciais de ingresso de agentes agressivos (Trigo; Conceição; Liborio, 2010; Bomediano; Gomes; Fontanini, 2020), umidade e oxigênio na interface entre substrato e reparo. Elas podem advir do próprio processo de remoção do concreto deteriorado no substrato (Christodoulou *et al.*, 2014) ou de incompatibilidades físicas (Vaysburd; Emmons, 2004). Como terceira causa, aponta-se a contribuição de microcélulas de corrosão decorrentes de contaminação no substrato. Nesse caso, a depender do nível de contaminação, a despassivação ocorreria em algum momento independentemente de intervenção (Andrade; Castro; Pazini, 2021; Castro *et al.*, 2003; Christodoulou *et al.*, 2013). O reparo, por sua vez, tão somente eliminaria a região em degradação que funcionava como uma espécie de ânodo de sacrifício protegendo a região adjacente (Pruckner; Gjörv, 2002; Raupach, 1996, 2006).

A respeito da localização, a deterioração promovida pelo ânodo incipiente tem sido constatada tanto no interior do substrato, conforme Figura 2a (Barkey, 2004; Soleimani *et al.*, 2010), quanto exatamente na interface substrato-reparo (Castro *et al.*, 2003), como na Figura 2b. Em caso de má execução, quando a contaminação não foi toda removida na projeção vertical do reparo, pode-se também identificar deterioração na face inferior da armadura, em contato com o substrato contaminado, situação ilustrada na Figura 2c.

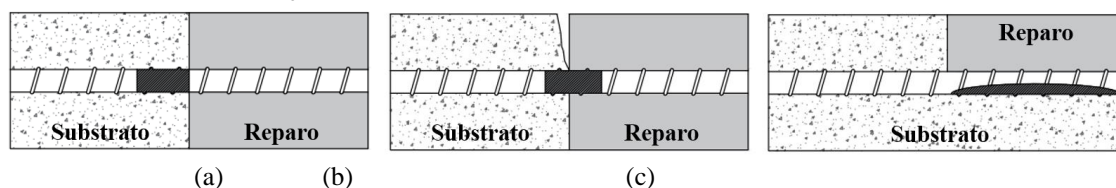
Figura 1 - Esquema da ocorrência típica do ânodo incipiente



Fonte: adaptado de Ali *et al.* (2018), Raupach (2006) e Page e Sergi (2000).

Legenda: A = Ânodo; e C = Cátodo.

Figura 2 - Possíveis localizações do ânodo incipiente



Fonte: adaptado de Medeiros (2002).

Por fim, intensidade e duração do ânodo incipiente também não são consenso na literatura. Há resultados que indicam um longo período com a corrente de corrosão elevada, em razão do ânodo incipiente, sem tendência de redução ao longo do tempo (Barkey, 2004; Hussain; Wasim; Ishida, 2010; Raupach, 1996). Por outro lado, há estudos que indicam um pico nos primeiros dias após o reparo, seguido de um decréscimo (Castro *et al.*, 2003; Eldho *et al.*, 2016), possivelmente em virtude da redução da porosidade, aumento da resistividade elétrica dos materiais e diminuição da disponibilidade de cloretos livres (Eldho *et al.*, 2016). Independentemente da duração da corrosão, resta necessário o aprofundamento do conhecimento a respeito da deterioração ocasionada, em função da possibilidade de ataque pontual com redução da seção das armaduras e potencial comprometimento da segurança estrutural (Gulikers, 1989).

Adição de Cinza de Casca de Arroz em argamassas de reparo

A Cinza de Casca de Arroz (CCA) provém da queima da casca do arroz produzida em seu processo de beneficiamento para obtenção dos grãos de arroz. Os países de elevada produção de arroz convivem com a dificuldade de destinação deste resíduo agroindustrial (Mehta; Monteiro, 2008; Zerbino; Giaccio; Isaia, 2011; Silva; Akasaki; Dasnoy, 2021), justificando a necessidade de estudos sobre este tema (Tashima *et al.*, 2012).

Além disso, pode-se também obter um material de alta pozolanicidade quando a queima da casca de arroz ocorre em condições controladas (Mehta; Monteiro, 2008). Nesse caso, a cinza é mantida na forma não-cristalina e em uma microestrutura celular, com área superficial da ordem de 50 a 60 m²/g. Esse material produzido em ambiente controlado é usualmente denominado como Sílica de Casca de Arroz (SCA), uma vez que possui relevante parcela amorfa e assemelha-se a outras adições pozolânica fabricadas.

Diversas pesquisas têm apontado melhorias advindas da incorporação do material ao concreto, tais como: redução da penetração de cloretos (Gastaldini *et al.*, 2010; Madandoust *et al.*, 2011; Isaia *et al.*, 2017; Cordeiro; Toledo Filho; Fairbairn, 2021), aumento da resistência à compressão com teor de substituição de até 10% (Bie *et al.*, 2015; Jamil *et al.*, 2016), densificação da microestrutura e redução do tamanho dos poros (MIYANDEHI *et al.*, 2016) e redução na condutividade elétrica com teor de substituição de 10% (Cascardo *et al.*, 2021).

Utilizando-se teores de substituição de 5% a 15% de SCA, nas pesquisas conduzidas no Centro de Estudos em Engenharia Civil (CESEC) da Universidade Federal do Paraná (UFPR), também foi identificada melhoria nas propriedades de resistência à compressão, absorção de água, penetrabilidade de cloretos (PINTO, 2020), aumento de resistividade elétrica (Raisdorfer, 2015; Real, 2015; Wosniack *et al.*, 2021; Araújo; Macioski; Medeiros, 2022), redução de variações dimensionais provenientes do ataque por sulfato de sódio (Souza, 2016; Souza; Medeiros; Hoppe Filho, 2020), manutenção da resistência à tração (Campos, 2020) e capacidade de redução da Reação Álcali-Sílica (Adorno, 2017).

Método

Configuração das amostras

Neste estudo, foram avaliadas amostras de substratos contaminados por cloretos não reparadas e reparadas com argamassa contendo sílica de casca de arroz (SCA). Para coleta dos dados, lançou-se mão do monitoramento periódico das densidades de corrente de corrosão com técnicas não destrutivas, avaliando a intensidade, localização e evolução ao longo do tempo. Além disso, ao final do experimento, realizou-se a inspeção destrutiva dos corpos de prova, com levantamento dos pontos de corrosão das armaduras.

Inicialmente, moldaram-se corpos de prova com substrato de concreto contaminado por cloretos, no teor de 1,4% de íons cloreto (Cl⁻) em relação à massa de cimento. Esse percentual corresponde ao dobro do valor usado por Castro *et al.* (2003), visando garantir a despassivação das armaduras. Uma vez que não se procura

exatamente o teor crítico de cloretos, qualquer outro valor suficientemente alto poderia ser adotado, desde que, por um lado, ocasionasse a despassivação das armaduras, e por outro, não se distanciasse excessivamente dos teores usualmente encontrados em estruturas reais.

Para o concreto, adotou-se traço 1:2,17:2,94 (cimento : areia: brita, em massa), consumo de cimento igual a 358 kg/m³, relação água/cimento de 0,60 e teor de argamassa de 51% com vistas à obtenção de uma resistência característica de 25 MPa aos 28 dias.

As argamassas de reparo foram preparadas com traço padrão 1:3 (cimento : areia, em massa), consumo de cimento 477 kg/m³ e relação água/cimento de 0,40. A substituição parcial de ligante (cimento Portland) por sílica de casca de arroz (SCA), em massa, foi feita em três níveis: 0% (referência), 10% e 20%. O índice de consistência fixado foi 200 mm ± 10 mm, obtido mediante adição de 1,5%, em relação à massa de cimento, de aditivo superplastificante base polímeros policarboxilatos.

Desse modo, as condições consideradas para o experimento foram amostras não reparadas e amostras reparadas com três diferentes tipos de argamassa. Produziram-se duplicatas, totalizando 8 corpos de prova, conforme mostra a Tabela 1.

Baseando-se na revisão da literatura, em especial nos trabalhos Raupach (1996), Castro *et al.* (2003) e Raupach (2006), definiu-se a seção transversal das amostras em 15 cm x 15 cm e comprimento de 60 cm, conforme Figura 3. A dimensão de 15 cm foi adotada para acomodar o conjunto de eletrodos e contraeletrodos do equipamento denominado GECOR10. Esse instrumento trata-se de um potenciostato portátil usado para a efetivação do monitoramento da corrosão de armaduras mediante medidas eletroquímicas. O comprimento de 60 cm, por sua vez, visou garantir a existência de três módulos de 15 cm (substrato x reparo x substrato), com folga de 7,5 cm nas laterais para as aferições.

Foram utilizadas duas barras de aço CA-50 de bitola 8,0 mm, comprimento de 70 cm e cobertura de 1,0 cm. Inicialmente, pretendia-se realizar também aferições em amostras carbonatadas artificialmente, de modo que se adotou o mínimo cobertura permitido para a dimensão máxima do agregado utilizado. Nos corpos de prova em que se pretendia simular a aplicação de um reparo localizado, posicionaram-se nichos de 15 cm x 15 cm x 15 cm, preenchidos com EPS. Os corpos de prova que não simulariam reparo foram moldados de forma inteiriça, com toda a fôrma preenchida por concreto.

As fôrmas foram preparadas com desmoldante e preenchidas com concreto proveniente de uma única betonada, em camada única, adensada em mesa vibratória por 30 s, com complementação, se necessária, para o adequado arrasamento. Após a moldagem, o concreto ficou protegido por lona plástica para cura durante o período de 24 h, até a desmoldagem.

Nas extremidades, os fios elétricos de seção 1,5 mm² foram soldados às pontas das armaduras para conectar ao GECOR10 durante as aferições (Figura 4a e 4b). Todas as conexões foram protegidas com fita de autofusão, demão de primer epóxi e pintura a base de poliuretano bicomponente, baseando-se nas montagens experimentais de Godinho *et al.* (2019). Considerando que as amostras ficariam submersas, para evitar a entrada de água no interior do isolamento do fio elétrico, na extremidade livre do fio foi utilizado terminal eletrônico (*junper*), conforme Figura 4c.

Tabela 1 - Configuração das amostras

Corpo de prova	Código	Reparo	%SCA	Substrato
1	NR-CI	Não	-	1,4% Cl ⁻
2				
3	R-CI-0	Sim	0%	
4				
5	R-CI-10	Sim	10%	
6				
7	R-CI-20	Sim	20%	
8				

Figura 3 - Corpo de prova para medição de potencial e densidade de corrente de corrosão com o GECOR10

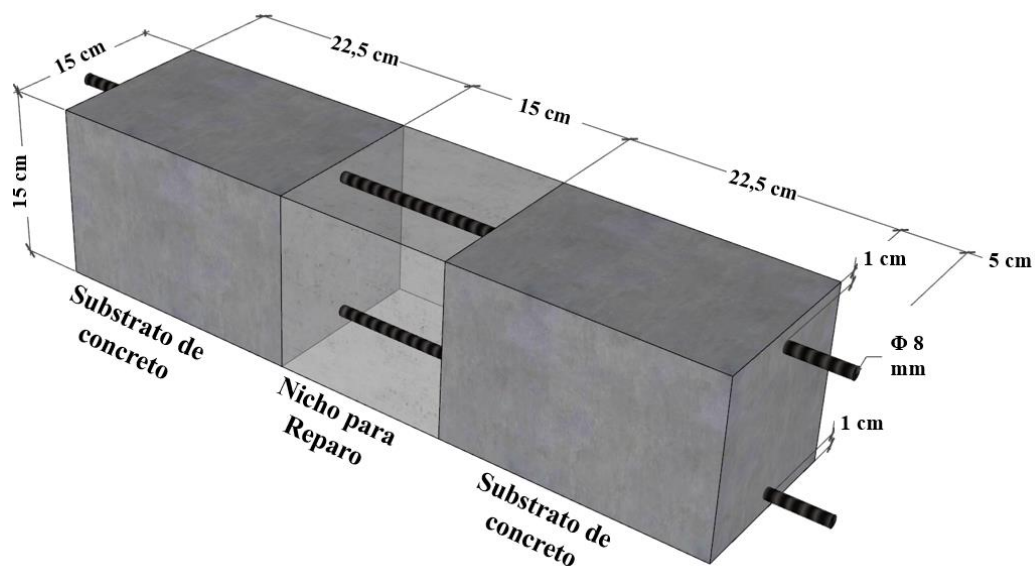
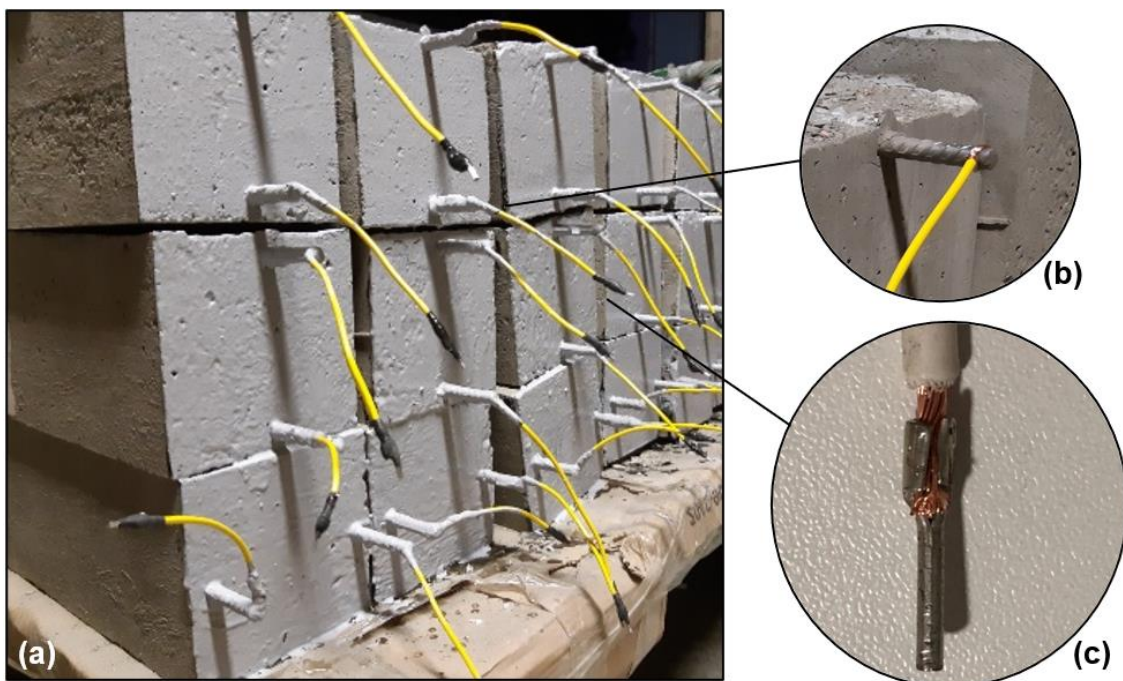


Figura 4 - Conexões elétricas das extremidades das barras e detalhes antes do isolamento



Realizada a desmoldagem e preparação dos terminais elétricos, ocorrida em um dia, os corpos de prova foram submersos para cura em solução saturada de hidróxido de cálcio por 90 dias. O tempo prolongado foi adotado com o objetivo de conferir maior grau de hidratação das amostras, em consonância com a idade das estruturas usualmente reparadas.

Procedeu-se, então, a remoção do EPS, apicoamento da superfície de contato e aplicação manual de argamassa de reparo. Em seguida, realizou-se a aspersão de água sobre os reparos, duas vezes ao dia nos sete primeiros dias. Por fim, as amostras foram novamente submersas em água para realização das aferições eletroquímicas.

Materiais

Empregou-se cimento Portland tipo CP V – ARI para o concreto e argamassas de reparo, com parâmetros de acordo com a NBR 16697 (ABNT, 2018). Como agregado miúdo e graúdo utilizaram-se, respectivamente, areia natural e pedrisco de origem basáltica (brita n.º “0”, $d_{\text{máx}} = 9,5$ mm). Os dados de granulometria da NBR NM 248 (ABNT, 2003a) constam na Figura 5, evidenciando o cumprimento dos requisitos da NBR 7211 (ABNT, 2009).

Na Tabela 2, por sua vez, apresentam-se os dados de teor de material pulverulento da NBR NM 46 (ABNT, 2003b); massa específica da NBR NM 52 (ABNT, 2003c) para agregado miúdo e da NBR NM 53 (ABNT, 2006a) para agregado graúdo; massa unitária da NBR NM 45 (ABNT, 2006b); e a absorção da NBR NM 30 (ABNT, 2001). Embora o teor de materiais pulverulentos tenha ficado acima dos limites de agregados miúdos e graúdos, 5% e 1%, entendeu-se que essa característica não iria interferir nos objetivos deste estudo.

As armaduras usadas são de aço CA-50 com 8,0 mm de diâmetro nominal. Antes da moldagem, todas foram previamente limpas em solução de ácido clorídrico e a hexametilenotetramina, conforme procedimento da G-1 (ASTM, 1999). Em seguida, todas as barras foram enxaguadas em água corrente para a completa remoção dos produtos aplicados para limpeza e completamente secas com papel toalha.

A Sílica de Casca de Arroz (SCA) provém de queima controlada em sistema de leito fluidizado. A Tabela 3 apresenta a caracterização desta adição pozzolânica.

Figura 5 - Curvas granulométricas dos agregados

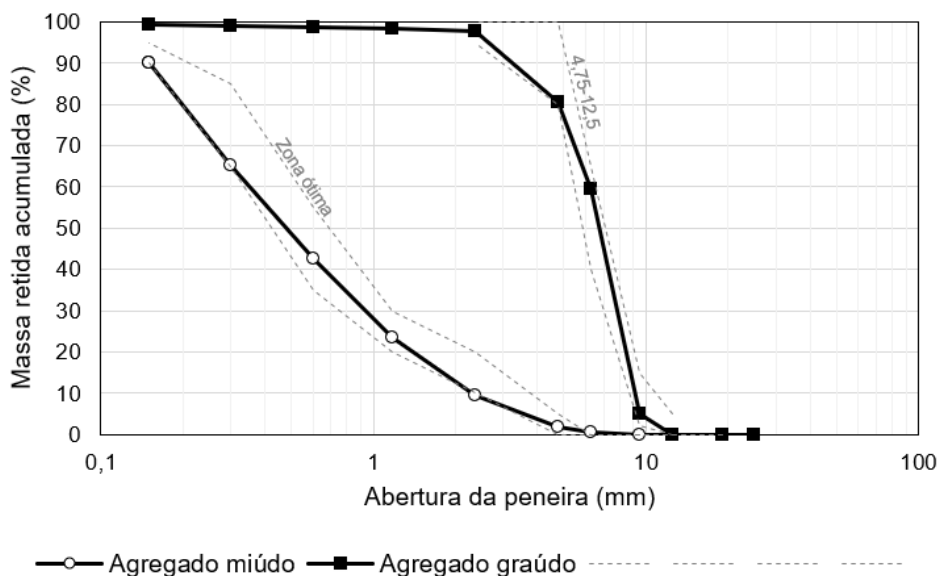


Tabela 2 - Caracterização dos agregados

Propriedade	Norma	Agregado miúdo	Agregado graúdo
Módulo de finura	NBR NM 248 (ABNT, 2003a)	2,33	5,79
Dimensão máxima característica (mm)	NBR NM 248 (ABNT, 2003a)	4,75	9,5
Massa unitária (g/cm ³)	NBR NM 45 (ABNT, 2006b)	1,60	2,39
Classificação	NBR 7211 (ABNT, 2009)	Zona ótima	4,75-12,5
Massa específica (g/cm ³)	NBR NM 52 e 53 (ABNT, 2003c, 2006a)	2,510	2,747
Absorção de água	NBR NM 30 (ABNT, 2001)	1,57%	1,59%
Teor de materiais pulverulentos	NBR NM 46 (ABNT, 2003b)	5,33%	7,11%

Tabela 3 - Caracterização química da SCA

Composição química (%)									Outras propriedades		
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O	Outros óxidos*	Perda ao fogo	A. Sup. BET (cm ² /g)	Massa esp. (g/cm ³)	Chapelle modificado (mg Ca(OH) ₂ /g amostra)
0,43	88,47	2,72	0,05	-	1,55	1,46	0,49	4,84	14,692	2,12	1336

Nota: CuO, ZnO, MnO, P₂O₅, Tm₂O₃ e Rb₂O.

Métodos

Em todas as amostras foram aferidos o potencial e densidade de corrente de corrosão por meio do GECOR10 (Figura 6a). A obtenção do potencial de corrosão pelo GECOR10 baseia-se na norma C876 (ASTM, 2015) e utiliza o eletrodo de referência de cobre/sulfato de cobre (CSE). A densidade de corrente de corrosão, por sua vez, foi obtida por meio da técnica de resistência de polarização linear com *Modulated Confinement Method* (Andrade; Martínez, 2005). Esta consiste na aplicação de uma corrente de baixa intensidade na armadura e aferição da mudança de potencial (potenciostato) (Cascardo, 1997). A perturbação introduzida pelo instrumento fica confinada em um anel de diâmetro de 110 mm, fornecendo maior precisão quanto à localização da deterioração. A aferição da densidade de corrente de corrosão é realizada pelo eletrodo central e outros dois eletrodos (Figura 6b) atuam de modo a regular a corrente aplicada.

O Gecor 10 determina a densidade de corrente de corrosão (i_{corr}) a partir da Equação 1.

$$i_{corr} = \frac{B}{R_p} \quad \text{Eq. 1}$$

Onde:

B é a constante de Stern-Geary, com valor igual a 52 mV; e

R_p é a resistência de polarização linear, em kΩxm².

As aferições foram realizadas em cinco pontos, iniciando-se na extremidade esquerda, percorrendo a amostra até a extremidade direita da amostra, conforme mostra a Figura 7. Foram realizadas medidas aos 21, 35, 249 e 500 dias após realização do reparo. A escolha desses marcos temporais se deu em razão da maior variabilidade nos primeiros dias, após a imersão das amostras. Além disso, para a obtenção de conclusões válidas para estruturas com maior idade, recomenda-se a continuidade das avaliações não destrutivas. Ressalta-se, ainda, que, quando da realização dos reparos, os corpos de prova tinham sido moldados há 106 dias, dos quais 90 dias se passaram em cura úmida submersa. Este tempo de cura elevado teve o intuito de fornecer tempo para a hidratação avançada do substrato e estabilização eletroquímica das barras de aço em função das mudanças ocasionadas pelas reações do aglomerante com a água.

Ao final das leituras de 500 dias após a aplicação dos reparos, procedeu-se também a inspeção destrutiva das amostras, por meio da ruptura do revestimento de concreto e extração das armaduras, na face superior de um dos corpos de prova de cada duplicata. As demais amostras foram conservadas para a continuação do monitoramento.

Resultados e discussões

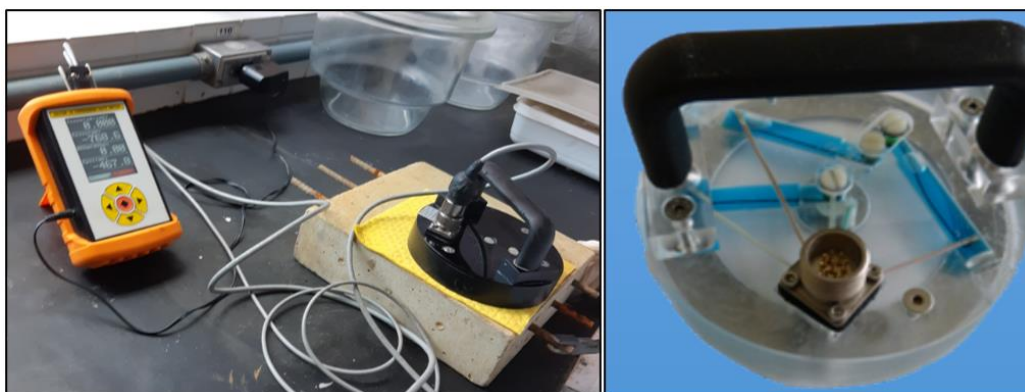
Amostra não reparada

Os resultados de densidade de corrente de corrosão (i_{corr}) e potencial de corrosão (E_{corr}) para o substrato contaminado por cloretos não reparado estão apresentados na Figura 8.

Observou-se que todos os valores de densidade de corrente de corrosão estão acima do valor adotado como limite entre o estado passivado e ativo de corrosão das armaduras, qual seja, 0,2 μA/cm² (Andrade; Alonso, 1996, 2004). Pode-se citar os trabalhos de Poursae e Hansson (2007) e de Ortolan, Mancio e Tutikian (2016) que também consideram 0,2 μA/cm² como o limite para considerar a despassivação das armaduras em compósitos de cimento Portland. Considera-se, então, que o processo de corrosão está instalado, uma vez que neste caso todo o substrato apresenta contaminação por íons cloreto. Também chama a atenção a

redução das taxas de corrosão na posição 4, para a qual não se identificou causa aparente, uma vez que a amostra foi moldada de forma inteiriça e não possui zona de interface reparo-substrato naquele ponto.

Figura 6 - Dispositivo GECOR 10



(a) Gecor10 em uso em um teste no LaME-UFPR (b) Sensor provido de eletrodos e anel de guarda para confinamento do sinal

Fonte: Geocisa Geotecnia y Cimentos S.A. (2015).

Figura 7 - Configuração para medição de potencial de corrosão (E_{corr}) e densidade de corrente de corrosão (i_{corr}) com o GECOR10

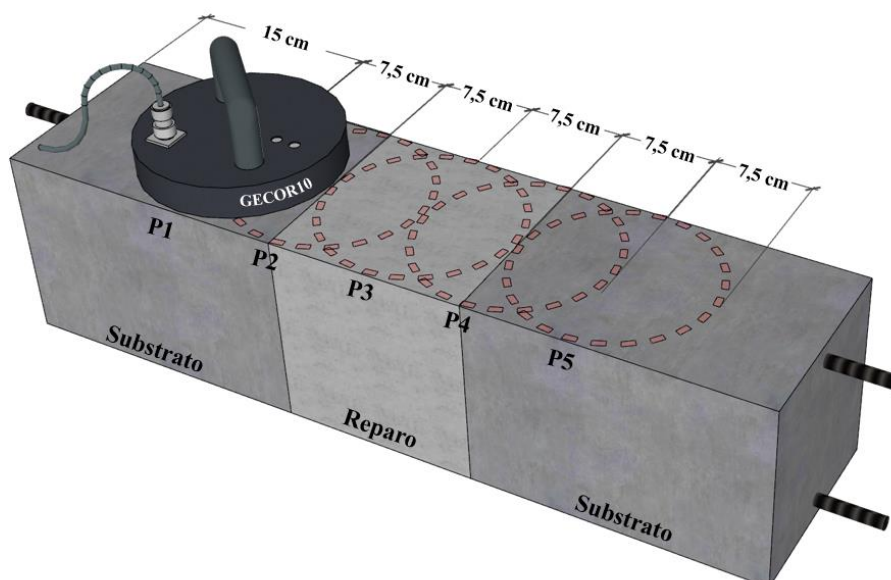
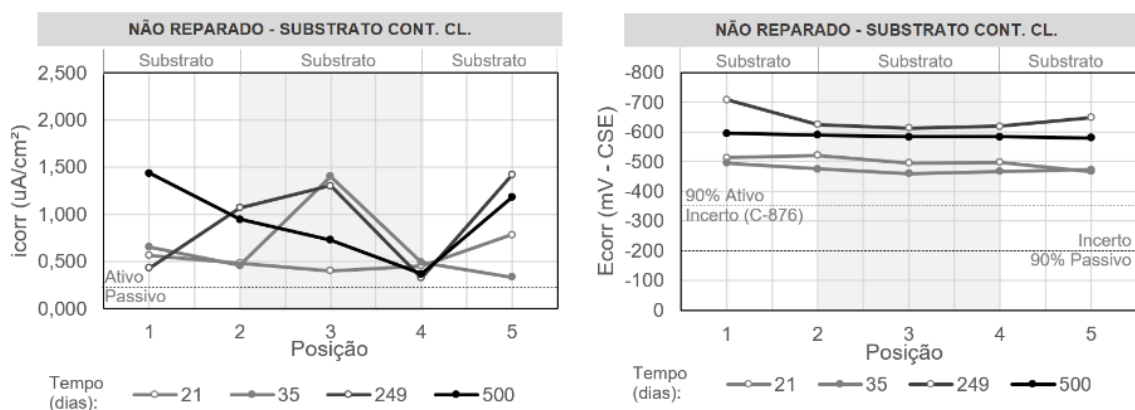


Figura 8 - Densidade de corrente de corrosão (i_{corr}) e potencial de corrosão (E_{corr}) aos 21, 35, 249 e 500 dias - amostras não reparadas



Os valores de potencial de corrosão, por sua vez, apresentam módulo superior ao patamar de 350 mV, definido pela C-876 (ASTM, 2015) como o limite a partir do qual há 90% de possibilidade de haver corrosão em curso. Verifica-se, com isso, que houve coerência nos limiares definidos pelo método, em consonância com o que foi apontado pela aferição de densidade de corrente de corrosão. No entanto, não foi possível estabelecer proporcionalidade entre o potencial de corrosão e as taxas de corrosão.

Além disso, não houve constatação de tendência de aumento ou diminuição da deterioração ao longo do período estudado. As taxas de corrosão variaram de forma errática ao longo do período das posições, com picos de aproximadamente $1,5 \mu A/cm^2$ nas regiões centrais da amostra aos 35 e 249 dias, seguido de picos também de $1,5 \mu A/cm^2$ nas extremidades aos 500 dias. Quanto ao potencial de corrosão, embora tenha apresentado aumento até os 249 dias com ligeira redução aos 500 dias, os valores estavam bastante próximos, com o que não é possível apontar tendência significativa.

Após a ruptura do revestimento de um dos corpos de prova, obteve-se a situação apresentada na Figura 9.

Observou-se a concentração de deterioração das armaduras na região esquerda da armadura (Figura 9 – b, c), embora os resultados do GECOR aos 500 dias indicassem concentração em ambas as extremidades do corpo de prova. Cabe esclarecer que os íons cloreto foram distribuídos uniformemente no concreto por meio da dissolução prévia na água de amassamento que, por sua vez, foi adicionada parceladamente à mistura. Desse modo, apesar da contaminação uniforme em toda a amostra, ficou evidenciada a formação de regiões anódicas localizadas, típicas da contaminação por cloretos.

Por outro lado, notou-se que os picos de densidade de corrosão observados:

- aos 35 e 249 dias na região central da amostra; e
- aos 500 dias na extremidade direita não resultaram em deterioração relevante constatada na inspeção destrutiva.

Essa divergência pode decorrer tanto de perturbações localizadas nas primeiras idades, quanto da própria variabilidade de localização de pontos de corrosão nas amostras. Ressalta-se que, objetivando obter resultados mais seguros, as aferições foram tomadas em duas barras em duplicadas. Desse modo, a inspeção destrutiva de metade de um dos corpos de prova não necessariamente corresponderia aos resultados das medidas eletroquímicas tomados em todas as amostras.

Amostra reparada com argamassa de referência (0% SCA)

Analisada a condição sem reparo, passa-se a apresentação dos resultados das amostras reparadas, conforme mostra a Figura 10, onde consta a densidade de corrente de corrosão (i_{corr}) e o potencial de corrosão (E_{corr}) obtidos nas amostras reparadas com argamassa de referência (0% SCA).

Neste caso, também se observam densidades de corrente de corrosão bastante elevadas, em patamares superiores a $0,2 \mu A/cm^2$ (Andrade; Alonso, 1996), indicando estado de corrosão em curso. Nas aferições realizadas aos 21 e 35 dias, os picos de corrosão ocorreram na região de interface reparo-substrato (posição 4) com valores de aproximadamente $1,7 \mu A/cm^2$ e $2,0 \mu A/cm^2$, respectivamente. Também nessas aferições, constata-se a elevada taxa de corrosão mesmo na região reparada. Por outro lado, nos dados de 249 e 500

dias, observa-se uma tendência de redução da densidade de corrente de corrosão na região reparada. Infere-se que as altas taxas de corrosão nos primeiros dias provêm da formação da película de passivação na região reparada.

Assim como no caso da amostra não reparada (Figura 8), o potencial de corrosão apresentou módulo superior ao patamar de 350 mV, também indicando 90% de possibilidade de haver corrosão em curso, em consonância com os resultados de densidade de corrente de corrosão. Por outro lado, na aferição aos 500 dias não foi identificada redução em módulo do potencial de corrosão na região do reparo (posição 3), ao contrário do que se esperava, haja vista que se trata de região reparada sem contaminação por cloretos e que houve redução da densidade de corrente de corrosão.

Ainda considerando os valores de E_{corr} , ressalta-se que, com exceção da aferição aos 21 dias, não se observou tendência clara de corrosão concentrada na região de interface reparo-substrato (posições 2 e 4).

Após a ruptura do cobrimento de um dos corpos de prova, obteve-se situação apresentada na Figura 11.

De modo semelhante à amostra não reparada, observou-se a concentração bastante clara de corrosão em uma das extremidades da amostra, neste caso, a extremidade direita (Figura 11d), em consonância com parte dos resultados do GECOR10 aos 500 dias. Por outro lado, embora as aferições com o GECOR10 não tenham indicado deterioração relevante na zona de interface reparo-substrato (posições 2 e 4), na inspeção destrutiva foi possível observar produtos de corrosão exatamente na interface substrato reparo (Figura 11b, 11c, 11e e 11f). Houve, inclusive, a presença de corrosão com escamação na posição 4, conforme consta na Figura 11f.

Amostra reparada com argamassa contendo 10% de SCA

Na próxima amostra estudada aplicou-se reparo utilizando argamassa com substituição de 10% de ligante por SCA. Os resultados de densidade de corrente de corrosão (i_{corr}) e potencial de corrosão (E_{corr}) estão apresentados na Figura 12.

De modo geral, observou-se que o teor de substituição de 10% de SCA apresentou redução na densidade de corrente de corrosão no substrato e no reparo, em relação à argamassa de reparo de referência. No entanto, houve dois picos na posição 4, de aproximadamente $2,8 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ e $1,2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, aos 21 e 500 dias, respectivamente. O valor aos 500 dias, considerado mais estável, está bastante acima dos encontrados na amostra não reparadas, de $0,4 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, e reparada com argamassa de referência, de $0,3 \mu\text{A}/\text{cm}^2$.

Figura 9 - Inspeção destrutiva - amostra não reparada

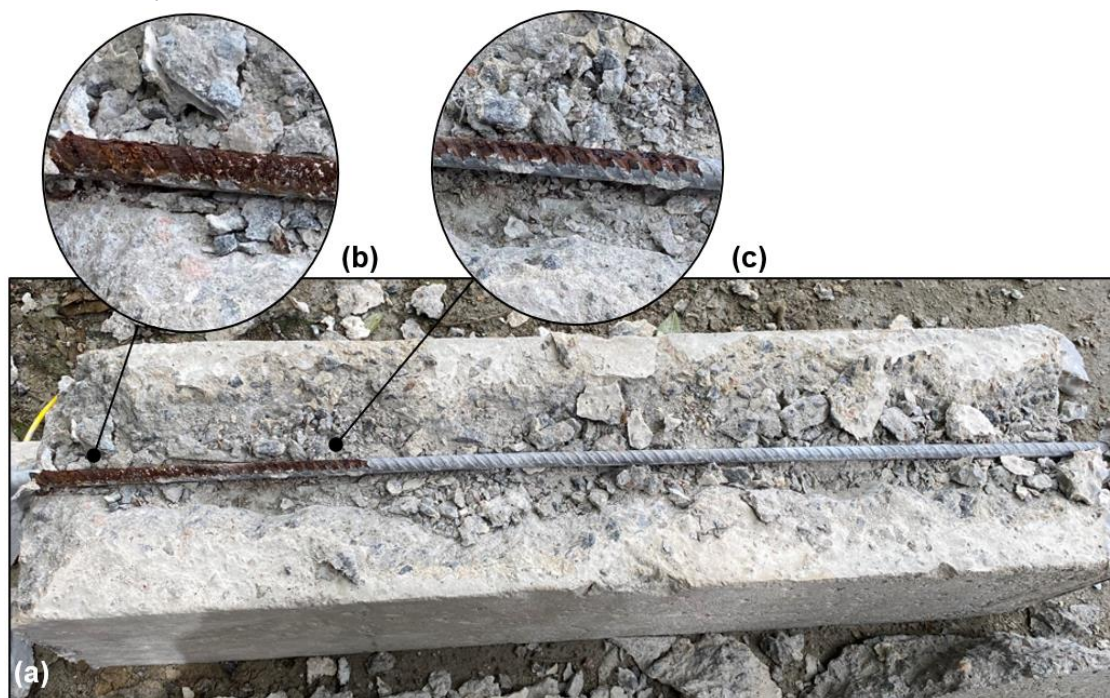


Figura 10 - Densidade de corrente de corrosão (i_{corr}) e potencial de corrosão (E_{corr}) aos 21, 35, 249 e 500 dias após realização do reparo - amostras reparadas - argamassa de referência (0% SCA)

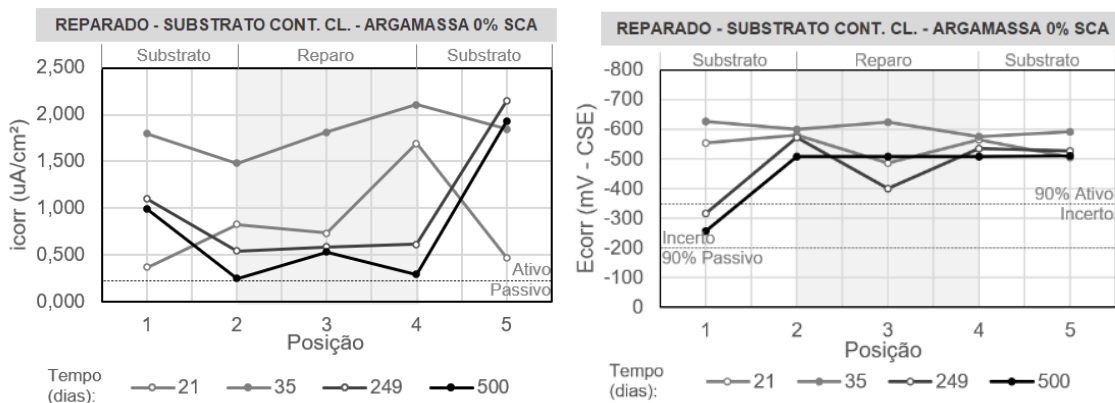


Figura 11 - Inspeção destrutiva - amostra reparada - argamassa de referência (0% SCA)

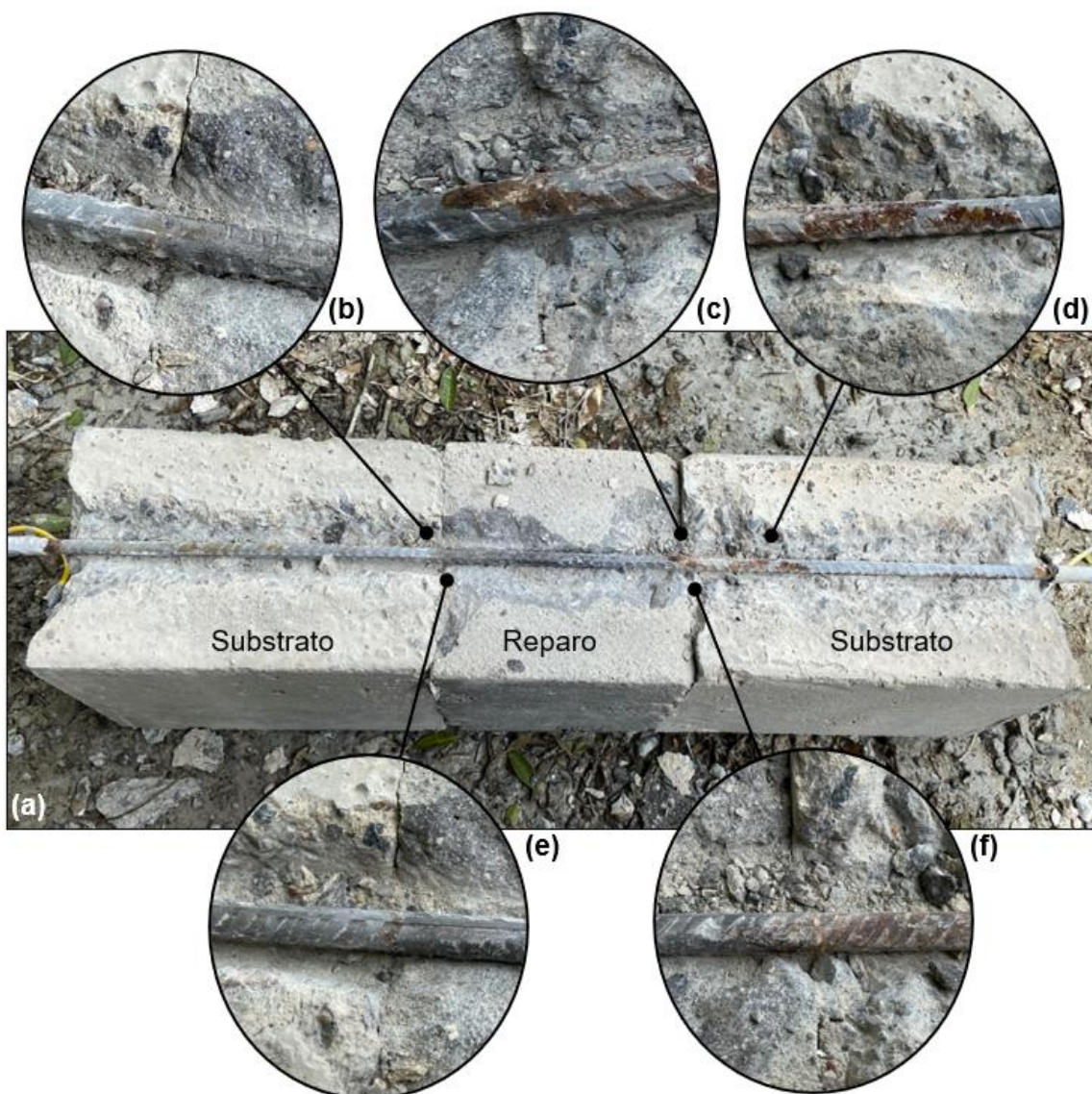
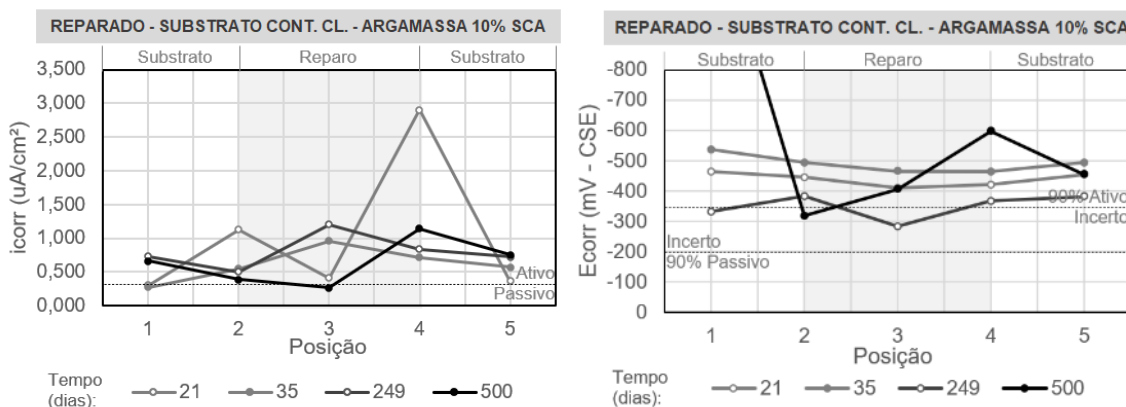


Figura 12 - Densidade de corrente de corrosão (i_{corr}) e potencial de corrosão (E_{corr}) tomados aos 21, 35, 249 e 500 dias após realização do reparo - amostras reparadas - argamassa com 10% de SCA



Como nas demais amostras, o potencial de corrosão apresentou módulo superior ao patamar de 350 mV e na aferição aos 500 dias não foi identificada redução em módulo do potencial na região do reparo (posição 3), ao contrário do que se esperava, haja vista que se trata de região reparada sem contaminação por cloretos.

Além disso, com exceção da aferição aos 21 dias, novamente não se observou tendência clara de deterioração na região de interface reparo-substrato (posições 2 e 4). Esse cenário pode indicar a baixa relevância da deterioração na zona de interface reparo-substrato se comparada à corrosão em curso no interior do substrato contaminado.

Após a ruptura do cobrimento de um dos corpos de prova, obteve-se a situação apresentada na Figura 13.

Observou-se, neste caso, a concentração de corrosão apenas em uma das extremidades da amostra, neste caso, a extremidade esquerda (Figura 13b e 13e), de modo diferente do que apontava o GECOR10 aos 500 dias para densidade de corrente de corrosão, com valores da mesma ordem de grandeza em ambas as extremidades da barra (Figura 12). Por outro lado, ressalta-se que, em consonância com a forte corrosão detectada no local, o GECOR10 indicou valor bastante elevado de potencial de corrosão aos 500 dias para a extremidade esquerda (posição 1).

Figura 13 - Inspeção destrutiva de amostra reparada - argamassa com 10% de SCA



Além disso, na inspeção destrutiva foi possível observar produtos de corrosão na interface substrato reparo (Figura 13c, 13d, 13f e 13g). A maior intensidade localizou-se na interface do lado direito (Figura 13d e 13g), de forma compatível com as aferições do GECOR10 para densidade de corrente de corrosão e potencial de corrosão. Por inspeção visual, verificou-se, ainda, que as deteriorações na zona de interface reparo-substrato foram menos severas do que as detectadas nos reparos realizados com argamassa de referência.

Amostra reparada com argamassa contendo 20% de SCA

Por fim, apresentam-se na Figura 14 os resultados de densidade de corrente de corrosão (i_{corr}) e potencial de corrosão (E_{corr}) para a amostra reparada utilizando argamassa com substituição de 20% de ligante por SCA.

Neste caso, houve aumento significativo das densidades de corrente de corrosão, com pico de aproximadamente $2,8 \mu A/cm^2$ aos 500 dias na posição 2. Aparentemente o elevado teor de substituição de cimento comprometeu a capacidade alcalina da argamassa para formação da película protetiva, pois os dados mostram atividade de corrosão em toda a área de reparo, com i_{corr} maiores na zona de reparo, se comparado com o substrato de concreto.

Deve-se destacar que, aos 500 dias, houve picos de i_{corr} nas interfaces. Como nos casos anteriores de reparo de referência (sem adição de SCA) e com 5% de SCA o comportamento não foi exatamente este, pode-se inferir que existe alguma relação da incompatibilidade eletroquímica com a intensidade do ânodo incipiente. Isso porque, a argamassa contendo 20% de SCA é a que mais se distancia da composição do substrato de concreto e, nesse cenário, pode ter havido uma intensificação da deterioração na zona de interface reparo-substrato.

Após a ruptura do cobrimento de um dos corpos de prova, obteve-se situação apresentada na Figura 15.

Ao contrário do que se observou nos outros reparos, neste caso notou-se o agravamento das deteriorações na região reparada (Figura 15c). Continua havendo corrosão significativa nas extremidades esquerda e direita no interior do substrato (Figura 15g), observando-se, ainda, corrosão na interface substrato-reparo (Figura 15b, 15d, 15e e 15g), conforme indicado pelo GECOR10. Cabe ressaltar que as deteriorações na interface substrato-reparo foram mais severas que nas demais substituições, de modo que, como já dito, pode-se inferir uma relação entre a incompatibilidade dos materiais de reparo e a intensidade do ânodo incipiente.

Figura 14 - Densidade de corrente de corrosão (i_{corr}) e potencial de corrosão (E_{corr}) tomados aos 21, 35, 249 e 500 dias após realização do reparo - amostras reparadas - argamassa com 20% de SCA

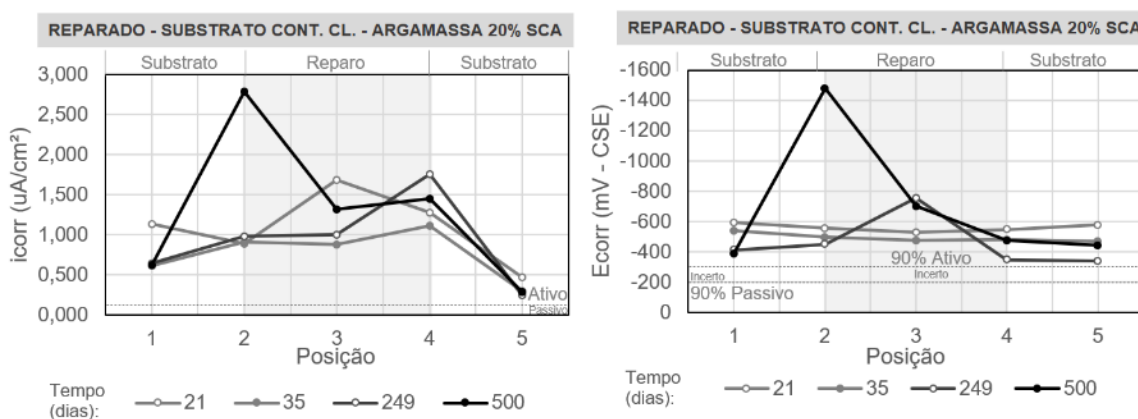
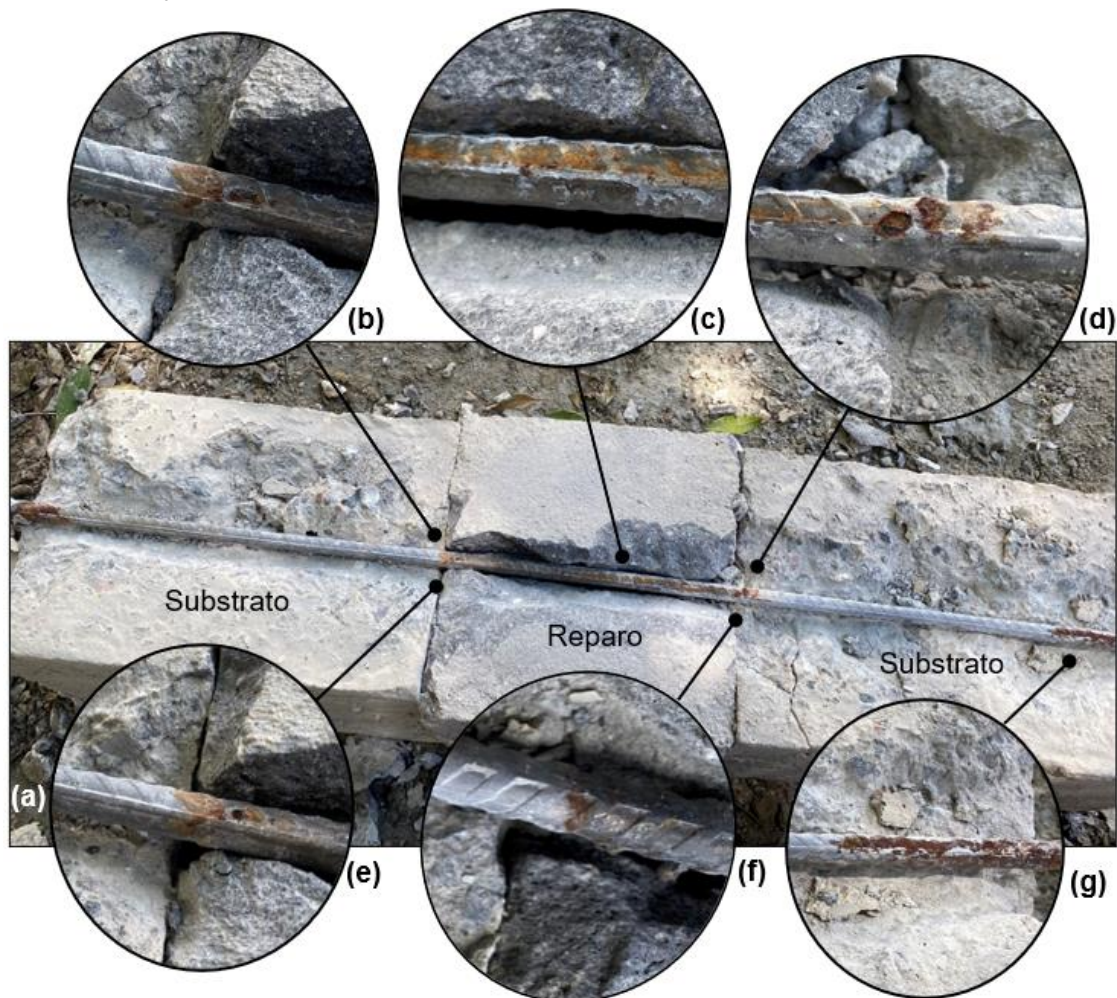


Figura 15 - Inspeção destrutiva - amostras reparadas - argamassa com 20% de SCA



Conclusão

O desenvolvimento deste trabalho experimental proporcionou a elaboração das conclusões apresentadas a seguir.

Sobre a interface substrato-reparo:

- (a) para todos os tipos de argamassa de reparo, houve corrosão concentrada na região de interface substrato-reparo. Isso ficou comprovado com medidas de i_{corr} e E_{corr} aos 500 dias e com a inspeção destrutiva;
- (b) o estudo mostra que, após a realização do reparo, há tendência de ocorrer deterioração localizada na região de interface reparo-substrato, em virtude de possíveis fragilidades na região de interface. Embora não tenham sido identificadas fissuras visíveis, infere-se que existam microfissuras ocasionadas pelo próprio processo de execução do reparo. Estas, por sua vez, podem ter comprometido a formação e estabilização da película passivadora pontualmente, bem como terem provido caminho preferencial para entrada de umidade e fornecimento de oxigênio para o processo corrosivo; e
- (c) a influência da incompatibilidade eletroquímica e da contaminação do substrato não foram diretamente estudadas. Ainda assim, convém ressaltar o fato de que houve maior deterioração na zona de interface reparo-substrato para a argamassa com 20% de SCA, que seria o material mais desigual em relação ao substrato, podendo indicar efeito significativo da incompatibilidade eletroquímica.

Sobre a área do reparo e sua capacidade de estagnar o processo de corrosão no reparo localizado:

- (a) deve-se destacar a argamassa contendo 20% de SCA, que apresentou densidade de corrente de corrosão elevada em todas as idades do monitoramento. Além disso, foi o caso com deteriorações mais severas

na zona de interface reparo-substrato, evidenciando uma possível incompatibilidade com o substrato e comprometimento da capacidade de passivação. Possivelmente este efeito está relacionado com a menor reserva alcalina nesta argamassa, com conseqüente redução do pH; e

- (b) quanto à eventual mitigação da corrosão na área com argamassa de reparo pela substituição de ligante por SCA, pode-se considerar que não foi efetiva para os valores de substituição parcial do cimento Portland por SCA nos teores de 10% e 20%.

É importante destacar que este trabalho envolveu o monitoramento de i_{corr} e E_{corr} , assim como a inspeção destrutiva até os 500 dias após a execução dos reparos localizados. Desse modo, as tendências dos parâmetros de funcionamento dos corpos de prova reparados podem mudar ao longo do tempo.

Referências

- ADORNO, C. S. **Efeitos físico-químicos de adições minerais na reatividade álcali-agregado em compósitos de cimento portland efeitos físico-químicos de adições minerais na reatividade álcali-agregado**. Curitiba, 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017.
- ALI, M. S. *et al.* An experimental study of electrochemical incompatibility between repaired patch concrete and existing old concrete. **Construction and Building Materials**, v. 174, p. 159–172, 2018.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C 876**: standard test method for corrosion potentials of uncoated reinforcing steel in concrete. Philadelphia, 2015.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **G1**: standard practice for preparing, cleaning, and evaluation corrosion test specimens. Philadelphia, 1999.
- ANDRADE, C.; ALONSO, C. Corrosion rate monitoring in the laboratory and on-site. **Construction and Building Materials**, v. 10, n. 5, p. 315–328, 1996.
- ANDRADE, C.; ALONSO, C. Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method. **Materials and Structures**, v. 37, n. 9, p. 623–643, 2004.
- ANDRADE, C.; MARTÍNEZ, I. Calibration by gravimetric losses of electrochemical corrosion rate measurement using modulated confinement of the current. **Materials and Structures**, v. 38, n. 283, p. 833–841, 2005.
- ANDRADE, M.; CASTRO, P.; PAZINI, E. Detection of corrosion risk besides patch repairs. **Hormigón y Acero**, v. 1, n. 1, p. 1–30, 2021.
- ARAÚJO, E. C.; MACIOSKI, G.; MEDEIROS, M. H. F. Concrete surface electrical resistivity: Effects of sample size, geometry, probe spacing and SCMs. **Construction and Building Materials**, v. 324, p. 126659, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697**: cimento Portland: requisitos. Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: agregados para concreto: especificação. Rio de Janeiro, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2003a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 30**: agregado miúdo: determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45**: agregados: determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52**: agregados miúdo: determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2003c.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53**: agregado graúdo: determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2006a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 46**: agregados: determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003b.

BALESTRA, C. E. T. *et al.* Chloride profile modeling contemplating the convection zone based on concrete structures present for more than 40 years in different marine aggressive zones. **Construction and Building Materials**, v. 198, p. 345-358, 2019.

BARKEY, D. P. Corrosion of steel reinforcement in concrete adjacent to surface repairs. **ACI Materials Journal**, v. 101, n. 29, p. 266–272, 2004.

BENTUR, A.; BERKE, N. S.; DIAMOND, S. **Steel corrosion in concrete: fundamentals and civil engineering practice**. London: Spon Press, 1997.

BIE, R. *et al.* Studies on effects of burning conditions and rice husk ash (RHA) blending amount on the mechanical behavior of cement. **Cement and Concrete Composites**, v. 55, p. 152–168, 2015.

BOMEDIANO, K. S.; GOMES, C. E. M.; FONTANINI, P. S. P. Propriedades da argamassa modificada com polímeros redispersíveis de etileno-acetato de vinila (EVA). **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 20, n. 3, p. 419-429, jul./set. 2020.

CAMPOS, P. A. **Matriz cimentícia contendo sílica de casca de arroz e hidróxido de cálcio: microestrutura, carbonatação e corrosão**. Curitiba, 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2020.

CASCUDO, O. *et al.* Evaluation of the pore solution of concretes with mineral additions subjected to 14 years of natural carbonation. **Cement and Concrete Composites**, v. 115, 2021.

CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras em concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas**. 2. ed. São Paulo: PINI, 1997.

CASCUDO, O.; CARASEK, H. Ação da carbonatação no concreto. In: ISAIA, G. C. (ed.). **Concreto: ciência e tecnologia**. 2. ed. São Paulo: Ibracon, 2011.

CASTRO, P. *et al.* Macrocell activity in slightly chloride-contaminated concrete induced by reinforcement primers. **Corrosion**, v. 59, n. 6, p. 535–546, 2003.

CHRISTODOULOU, C. *et al.* A new arrangement of galvanic anodes for the repair of reinforced concrete structures. **Construction and Building Materials**, v. 50, p. 300–307, 2014.

CHRISTODOULOU, C. *et al.* Diagnosing the cause of incipient anodes in repaired reinforced concrete structures. **Corrosion Science**, v. 69, p. 123–129, 2013.

CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, D.; FAIRBAIRN, E. M. R. Influência da substituição parcial de cimento por cinza ultrafina da casca de arroz com elevado teor de carbono nas propriedades do concreto. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 9, p. 99-107, 2021.

DUARTE, R. G. *et al.* Corrosion behavior of stainless steel rebars embedded in concrete: an electrochemical impedance spectroscopy study. **Electrochimica Acta**, v. 124, p. 218-224, 2014.

ELDHO, C. A. *et al.* Macrocell corrosion formation in concrete patch repairs: a laboratory study. **Key Engineering Materials**, v. 711, p. 68–75, 2016.

EMMONS, P. H.; VAYSBURD, A. M. System concept in design and construction of durable concrete repairs. **Construction and Building Materials**, v. 10, n. 1, special issue, p. 69–75, 1996.

GASTALDINI, A. L. G. *et al.* Influence of curing time on the chloride penetration resistance of concrete containing rice husk ash: a technical and economical feasibility study. **Cement and Concrete Composites**, v. 32, p. 783–793, 2010.

GEOCISA GEOTECNIA Y CIMENTOS S.A. **GECOR 10: manual del operador**. Madrid: Geocisa, 2015.

GODINHO, J. P. *et al.* Comportamento eletroquímico do aço carbono inserido no concreto durante a passivação. **Revista Técnico-Científica do CREA-PR**, edição especial, set. 2019.

GONZALEZ, J. A. *et al.* Some questions on the corrosion of steel in concrete: part I: when, how and how much steel corrodes. **Materials and structures**, v. 29, n. 1, p. 40-46, 1996.

GULIKERS, J. Influence of local repairs on corrosion of steel reinforcement. **IABSE Reports Durability of Structures**, v. 57, n. 1, set. 1989.

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. São Paulo, 1993. Tese (livre docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

- HELENE, P. R. L. **Manual para reparo, reforço e proteção de estruturas de concreto**. São Paulo: PINI, 1992.
- HUSSAIN, R. R.; WASIM, M.; ISHIDA, T. Induced macro-cell corrosion phenomenon in the simulated repaired reinforced concrete patch. **Australian Journal of Civil Engineering**, v. 8, n. 1, p. 53–49, 2010.
- ISAIA, G. C. *et al.* Viabilidade do emprego de cinza de casca de arroz natural em concreto estrutural (parte II): durabilidade. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 17, n. 2, p. 233-252, abr./jun. 2017.
- JAMIL, M. *et al.* Physical and chemical contributions of Rice Husk Ash on the properties of mortar. **Construction and Building Materials**, v. 128, p. 185–198, 2016.
- KAMDE, D. K. *et al.* Long-term performance of galvanic anodes for the protection of steel reinforced concrete structures. **Journal of Building Engineering**, v. 42, p. 103049, 2021.
- KRISHNAN, N. *et al.* Long-term performance and life-cycle-cost benefits of cathodic protection of concrete structures using galvanic anodes. **Journal of Building Engineering**, v. 42, p. 102467, 2021.
- MADANDOUST, R. *et al.* Mechanical properties and durability assessment of rice husk ash concrete. **Biosystems engineering**, v. 110, n. 2, p. 144-152, 2011.
- MEDEIROS, M. H. F. **Estruras de concreto com corrosão de armaduras por carbonatação: comparação de argamassas de reparo quanto à proteção do aço**. São Paulo, 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.
- MEDEIROS, M. H. F. *et al.* Inspeção no palacio de la luz – Montevideo: uma visão de durabilidade. **Revista de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción**, v. 2, n. 2, p. 93-108, 2012.
- MEDEIROS, M. H. F. *et al.* Reinforced concrete in marine environment: Effect of wetting and drying cycles, height and positioning in relation to the sea shore. **Construction and Building Materials**, v. 44, p. 452-457, 2013.
- MEDEIROS, M. H. F.; DASCHEVI, P. A.; ARAÚJO, E. C. Reparo localizado para estruturas de concreto armado: erros, acertos e reflexões. **Concreto & Construções**, v. 106, p. 66-71, 2022.
- MEDEIROS-JUNIOR, R. A. *et al.* Carbonation depth in 57 years old concrete structures. **Steel and Composite Structures**, v. 19, n. 4, p. 953-966, 2015.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Ibracon, 2008.
- MIYANDEHI, B. M. *et al.* Performance and properties of mortar mixed with nano-CuO and rice husk ash. **Cement and Concrete Composites**, v. 74, p. 225–235, 2016.
- ORTOLAN, V. K.; MANCIO, M.; TUTIKIAN, B. F. Evaluation of the influence of the pH of concrete pore solution on the corrosion resistance of steel reinforcement. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**, v. 1, n. 1, p. 10, 2016.
- PAGE, C. L.; SERGI, G. Developments in cathodic protection applied to reinforced concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 1, p. 8–15, 2000.
- PINTO, M. A. R. **Efeito de adições pozolânicas na penetração de cloreto de potássio no concreto: uma contribuição para indústrias de fertilizantes**. Curitiba, 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2020.
- POURSAEE, A.; HANSSON, C. M. Reinforcing steel passivation in mortar and pore solution. **Cement and Concrete Research**, v. 37, p. 1127–1133, 2007.
- PRUCKNER, F.; GJØRV, O. E. Patch repair and macrocell activity in concrete structures. **ACI Materials Journal**, v. 99, n. 2, p. 143–148, 2002.
- RAISDORFER, J. W. **Influência da adição ou substituição de adições minerais ao Cimento Portland: efeitos na carbonatação, absorção capilar e resistividade de concretos**. Curitiba, 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil)– Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.
- RAUPACH, M. Chloride-induced macrocell corrosion of steel in concrete-theoretical background and practical consequences. **Construction and Building Materials**, v. 10, n. 5, p. 329–338, 1996.

- RAUPACH, M. Patch repairs on reinforced concrete structures: model investigations on the required size and practical consequences. **Cement and Concrete Composites**, v. 28, n. 8, p. 679–684, 2006.
- REAL, L. V. **Efeito de adições pozolânicas na estimativa de vida útil do concreto exposto a cloretos através da resistividade elétrica superficial**. Curitiba, 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.
- RÉUS, G. C.; MEDEIROS, M. H. F. Chemical realkalization for carbonated concrete treatment: Alkaline solutions and application methods. **Construction and Building Materials**, v. 262, p. 120880, 2020.
- RIBEIRO, J. L. S.; PANOSSIAN, Z.; SELMO, S. M. S. Proposed criterion to assess the electrochemical behavior of carbon steel reinforcements under corrosion in carbonated concrete structures after patch repairs. **Construction and Building Materials**, v. 40, p. 40–49, 2013.
- SCHIELBL, P.; BREIT, W.; RAUPACH, M. Durability of local repair measures on concrete structures damaged by reinforcement corrosion. **Concrete Durability**, v. 145, p. 1195–1216, 1994.
- SILVA, E. J. D.; AKASAKI, J. L.; DASNOY, J. R. Influência das variáveis envolvidas no plantio de arroz nas características da cinza de casca de arroz. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 9, n. 4, p. 67-82, out./dez. 2021.
- SOLEIMANI, S. *et al.* Modeling the kinetics of corrosion in concrete patch repairs and identification of governing parameters. **Cement and Concrete Composites**, v. 32, p. 360–368, 2010.
- SOUZA, D. J. **Capacidade de adições minerais em mitigar o ataque por sulfatos de sódio e magnésio em argamassas de cimento Portland**. Curitiba, 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.
- SOUZA, D. J.; MEDEIROS, M. H. F.; HOPPE FILHO, J. Evaluation of external sulfate attack (Na_2SO_4 and MgSO_4): Portland cement mortars containing siliceous supplementary cementitious materials. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 13, 2020.
- SOUZA, L. R. A. *et al.* Electrochemical chloride extraction: efficiency and impact on concrete containing 1% of NaCl. **Construction and Building Materials**, v. 145, p. 435-444, 2017.
- TASHIMA, M. M. *et al.* Cinza de casca de arroz (CCA) altamente reativa: método de produção e atividade pozolânica. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 12, n. 2, p. 151-163, jun. 2012.
- TILLY, G. P.; JACOBS, J. **Concrete Repairs: performance in service and current practice**. Bruxelas: IHS BRE Press, 2007.
- TRIGO, A. P. M.; CONCEIÇÃO, R. V. da; LIBORIO, J. B. L. A técnica de dopagem no tratamento da zona de interface: ligações entre concreto novo e velho. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 10, n. 1, p. 167-176, mar. 2010.
- VAYSBURD, A. M.; EMMONS, P. H. Corrosion inhibitors and other protective systems in concrete repair: Concepts or misconcepts. **Cement and Concrete Composites**, v. 26, n. 3, p. 255–263, 2004.
- WANG, K.; HELENE, P. R. do L.; MONTEIRO, P. J. M. Potential use of zinc in the repair of corroded reinforced concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 28, n. 8, p. 707–715, 2006.
- WOSNIACK, L. M. *et al.* Resistividade elétrica do concreto pelo ensaio de migração de cloretos: comparação com o método dos quatro eletrodos. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 21, n. 3, p. 321-340, jul./set. 2021.
- ZERBINO, R.; GIACCIO, G.; ISAI, G. Concrete incorporating rice-husk ash without processing. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 1, p. 371-378, 2011.
- ZHANG, J.; MAILVAGANAM, N. P. Corrosion of concrete reinforcement and electrochemical factors in concrete patch repair. **Canadian Journal of Civil Engineering (print)**, v. 26, p. 255–263, 2006.

Paulo Augusto Daschevi

Concepção, Pesquisa, Metodologia, Análise de dados, Redação do manuscrito original, Redação - revisão e edição.

Centro de Estudos em Engenharia Civil | Universidade Federal do Paraná | Av. Cel. Francisco H. dos Santos, 100, Jardim das Américas | Curitiba - PR - Brasil | CEP 81530-000 | Tel.: (43) 99617-8898 | E-mail: pauloaugustodaschevi@hotmail.com

Marcelo Henrique Farias de Medeiros

Concepção, Pesquisa, Metodologia, Análise de dados, Redação - revisão e edição.

Centro de Estudos em Engenharia Civil | Universidade Federal do Paraná | Tel.: (41) 99814-3035 | E-mail: medeiros.ufpr@gmail.com

Editores: **Ercília Hitomi Hirota, Juliana parise Baldauf e Eduardo Pereira**

Ambiente Construído

Revista da Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído

Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar, Centro

Porto Alegre - RS - Brasil

CEP 90035-190

Telefone: +55 (51) 3308-4084

www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido

www.scielo.br/ac

E-mail: ambienteconstruido@ufrgs.br



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License.