

Formação de ânodos incipientes em reparos localizados de argamassa com adição de sílica de casca de arroz

I. R. Remenche^{1*}, P. A. Daschevi² , N. F. Holowka³, L. C. Martioli¹, M. H. F. Medeiros¹ 

* Autor de Contato: igorrossi@ufpr.br

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v14i3.763>

Recebido: 01/06/2024 | Correções recebidas: 02/08/2024 | Aceito: 20/08/2024 | Publicado: 01/09/2024

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi investigar como o ânodo incipiente pode ser detectado e monitorado em áreas de reparo localizado com argamassas contendo adição de sílica de casca de arroz. Foram testadas três condições de reparo em corpos de prova prismáticos: sem reparo, com reparo sem adição de sílica de casca de arroz e com adição de sílica de casca de arroz na argamassa. Realizaram-se ensaios de potencial de corrosão e resistividade elétrica. O ensaio de potencial de corrosão não apresentou variação ao longo da barra, enquanto o ensaio de resistividade elétrica apresentou valores variados em função da zona reparada e não reparada. Concluiu-se que a adição de sílica de casca de arroz na argamassa tornou o potencial de corrosão mais eletronegativo devido à maior diferença de resistividade elétrica em relação ao substrato, contribuindo para a formação do ânodo incipiente.

Palavras-chave: ânodo incipiente; incompatibilidade eletroquímica; reparo; potencial de corrosão e resistividade elétrica superficial.

Citar como: Remenche, I. R., Daschevi, P. A., Holowka, N. F., Martioli L. C., Medeiros, M. H. F. (2024), "Formação de ânodos incipientes em reparos localizados de argamassa com adição de sílica de casca de arroz" Revista ALCONPAT, 14 (3), pp. 255 – 274, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v14i3.763>

¹ Program of Graduate Studies in Civil Engineering, Federal University of Paraná (UFPR), Curitiba, Brazil.

² Court of Accounts of Paraná, Curitiba, Brazil.

³ Program of Graduate Studies in Civil Engineering, Federal Technological University of Paraná (UTFPR), Curitiba, Brazil.

Contribuição de cada autor

Neste trabalho, o autor I. R. Remenche contribuiu com a atividade de coleta de dados (50%), revisão bibliográfica (50%) e redação do trabalho (60%). O autor P. A. Daschevi contribuiu com a ideia original e revisão do trabalho. O autor N. F. Holowka atuou no levantamento da coleta de dados (50%). O autor L. C. Martioli contribuiu com o preparo das imagens e revisão bibliográfica (20%). O autor M. H. F. Medeiros colaborou com a redação do trabalho (40%), revisão bibliográfica (30%) e como orientador e revisor geral do trabalho.

Licença Creative Commons

Copyright (2024) é propriedade dos autores. Este trabalho é um artigo de acesso aberto publicado sob os termos e condições de uma Licença Internacional Creative Commons Atribuição 4.0 ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discussões e correções pós-publicação

Qualquer disputa, incluindo as respostas dos autores, será publicada na segunda edição de 2025, desde que as informações sejam recebidas antes do fechamento da primeira edição de 2025.

Formation of incipient anodes in localized mortar repairs with the addition of rice husk silica

ABSTRACT

The objective of this work was to investigate how incipient anodes can be detected and monitored in localized repair areas using mortars with added rice husk silica. Three repair conditions were tested on prismatic specimens: without repair, with repair without rice husk silica addition, and with rice husk silica addition in the mortar. Corrosion potential and electrical resistivity tests were conducted. The corrosion potential test showed no variation along the bar, while the electrical resistivity test showed varied values depending on the repaired and non-repaired zones. It was concluded that adding rice husk silica to the mortar made the corrosion potential more electronegative due to the greater difference in electrical resistivity compared to the substrate, contributing to the formation of incipient anodes.

Keywords: Incipient anode; electrochemical incompatibility; repair; corrosion potential; surface electrical resistivity.

Formación de ánodos incipientes en reparaciones localizadas de morteros con adición de sílice de cáscara de arroz

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue investigar cómo se puede detectar y monitorear el ánodo incipiente en áreas de reparación localizadas con morteros que contienen adición de sílice de cáscara de arroz. Se probaron tres condiciones de reparación en probetas prismáticas: sin reparación, con reparación sin adición de sílice de cáscara de arroz y con adición de sílice de cáscara de arroz en el mortero. Se realizaron pruebas de potencial de corrosión y resistividad eléctrica. La prueba de potencial de corrosión no mostró variación a lo largo de la barra, mientras que la prueba de resistividad eléctrica mostró valores variables dependiendo del área reparada y no reparada. Se concluyó que la adición de sílice de cáscara de arroz al mortero hizo que el potencial de corrosión fuera más electronegativo debido a la mayor diferencia de resistividad eléctrica con relación al sustrato, contribuyendo a la formación del ánodo incipiente.

Palabras clave: ánodo incipiente; incompatibilidad electroquímica; reparar; potencial de corrosión y resistividad eléctrica de la superficie.

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

Reserva de direitos de uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado.

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

A reprodução total ou parcial do conteúdo e das imagens da publicação é realizada de acordo com o código COPE e a licença CC BY 4.0 da Revista ALCONPAT.

1. INTRODUÇÃO

De acordo com o relatório da NACE International (2016), estima-se que a despesa global com a corrosão equivale a 2,5 trilhões de dólares, correspondendo a 3,4% do PIB global. A mesma fonte propõe que, se fossem adotadas práticas de controle contra a corrosão, poderiam ser economizados entre 15% e 35%, o equivalente a 375 a 875 bilhões de dólares anualmente. No Brasil, os prejuízos devido à corrosão em 2015 representaram 4% do PIB, o que corresponde a R\$ 236 bilhões (GRANDES CONSTRUÇÕES, 2017).

Em relação ao aço em elementos estruturais de concreto armado, segundo Mehta e Monteiro (2008), originalmente acreditava-se que a armadura, quando protegida do contato direto com o ar por uma camada de concreto de cimento Portland com baixa porosidade capilar, não sofreria corrosão, nem apresentaria manifestações patológicas. No entanto, na prática e com o passar dos anos, observou-se que essa suposição não se sustentava, pois os problemas de durabilidade se contrapunham como evidências. Desse modo, os fatos tornaram evidente que, em estruturas de concreto armado, a corrosão do aço pode se agravar logo nas primeiras fases da vida útil, mesmo quando o concreto é compacto e tem mistura adequada.

Neste contexto, foi se estabelecendo a compreensão de que as estruturas de concreto armado precisam de uma vida útil elevada e consistente com o projeto, para evitar a redução drástica das propriedades relacionadas com a sua durabilidade, evitando o maior consumo de materiais na indústria da construção civil e despesas adicionais com reparos precoces. Sobre este tema, de acordo com Krishnan *et al.* (2021), o documento NACE Impact Report (2016) indica que cerca de 50% das estruturas de concreto armado precisam ser submetidas ao reparo dentro de 10 anos após a sua construção. Geralmente a solução adotada é a execução de reparos localizados.

Desse modo, sobre o tema dos reparos de estruturas de concreto armado, existe a técnica de reparo localizado de áreas corroídas, com procedimentos padronizados e materiais tradicionais e materiais mais inovadores que foram sendo propostos ao longo das últimas décadas. Porém, tem sido comum verificar, nas condições práticas, a falha destes serviços de reparo em poucos anos, necessitando de retrabalho e aplicação de novos materiais, gerando mais consumo de materiais e impacto ambiental.

Em resumo, é fato que os reparos convencionais adotados em muitas estruturas estão falhando em cerca de 5 anos, gerando a necessidade de reparos repetidos e aumento significativo no custo total da corrosão e no custo do ciclo de vida das estruturas de concreto armado. Os motivos para as falhas prematuras permeiam pela falta de rigor técnico na execução, pela incorreta especificação de materiais e pela economia nos sistemas de reparo (reparos incompletos para reduzir custo), de modo a não se atingir a estagnação plena do processo de corrosão instalado.

Neste contexto, sabe-se que a corrosão em estruturas reparadas costuma reiniciar principalmente na interface entre o concreto antigo e a área reparada, gerando a formação de ânodos incipientes. Sendo assim, a corrosão pode continuar a progredir dentro do concreto, mesmo após uma seção de concreto deteriorado ter sido removida e substituída por um novo material de reparo.

Vários estudos buscaram entender a formação de ânodos incipientes em reparos localizados, os efeitos causados por essa manifestação patológica e os métodos para mitigá-los (Castro *et al.*, 2003; Christodoulou *et al.*, 2013; Luković *et al.*, 2017; Ali *et al.*, 2018; Kamde *et al.*, 2021). Nesse contexto, Castro *et al.* (2003) analisaram amostras prismáticas com reparos localizados em concreto contaminado com 0,7% de cloreto em massa. Os autores avaliaram quatro sistemas para a região reparada: (1) apenas repassivação alcalina na área reparada, (2) aplicação de um primer de um componente com resina epóxi rica em zinco, e (3-4) dois primers diferentes de dois componentes.

Christodoulou *et al.* (2013) estudaram reparos localizados em estruturas de campo, especificamente um estacionamento de vários andares exposto ao ataque de cloretos e uma ponte de concreto armado com múltiplos vãos. Os autores realizaram reparos em áreas de concreto deteriorado

utilizando três materiais diferentes para observar a formação de ânodos incipientes: um microconcreto fluido à base de cimento Portland, modificado por polímeros e compensado para retração; uma argamassa de reparo à base de cimento Portland, modificada por polímeros, compensada para retração com adição de cinza de sílica; e uma argamassa de reparo não retraível à base de cimento magnésia-fosfato.

Posteriormente, Luković *et al.* (2017) expandiram essa pesquisa avaliando a aplicabilidade dos compósitos cimentícios com endurecimento por deformação em reparos submetidos a corrosão em andamento, bem como estudando o uso de argamassas de reparo não reforçadas e materiais de reparo comerciais. Enquanto isso, Ali *et al.* (2018) investigaram várias estratégias de reparo disponíveis no mercado usando amostras prismáticas expostas a diferentes condições com e sem cloretos.

Desse modo, o presente trabalho tem como objetivo avaliar os efeitos da presença de reparos localizados com a utilização de sílica de casca de arroz (SCA) na formação dos ânodos incipientes. Para isso, foram consideradas duas condições de exposição na preparação dos corpos de prova: um grupo contaminado por cloretos e outro não contaminado. Além disso, o estudo analisou três cenários diferentes para o reparo: a peça de concreto sem reparo, além de corpos de prova com reparo de argamassa de cimento Portland puro e corpos de prova com reparo de argamassa com a adição de sílica de casca de arroz na composição do aglomerante. Também foram realizados dois ensaios não destrutivos para avaliar a integridade do elemento estrutural: potencial de corrosão (E_{corr}) e resistividade elétrica superficial. A análise buscou contribuir para a verificação da formação do ânodo incipiente em concretos com adição de sílica de casca de arroz e averiguar se a atividade pozolânica intensifica o processo de corrosão devido à formação do ânodo incipiente. Para tanto, inicialmente foi apresentada a fundamentação teórica que sustentou a análise, os métodos mobilizados na investigação para determinar a presença do ânodo incipiente, os resultados da análise e a discussão dos dados, e, por fim, as conclusões.

2. FORMAÇÃO DE ÂNODOS INCIPIENTES

Quando se executa serviços de reparo localizado, é comum remover o concreto que apresenta rachaduras ou fissuras e até mesmo que esteja contaminado com cloretos. Por isso, há a necessidade de limpar a barra de aço e substituir o concreto antigo por um novo compósito, chamado de material de reparo. Porém, mesmo após o reparo, a corrosão pode continuar. Isso se deve à diferença no comportamento eletroquímico entre o concreto antigo e o novo, armaduras limpas de forma inadequada, alta permeabilidade do concreto, etc.

Desse modo, o "Efeito do Ânodo Incipiente" é um fenômeno importante a ser considerado no contexto de reparos localizados de argamassas em uma peça de concreto armado, especialmente quando se lida com a corrosão das armaduras de aço.

O termo "ânodo incipiente" refere-se a uma área localizada na interface entre o concreto e o reparo estrutural que acarreta a formação do processo de corrosão ativa das armaduras (LUCOVIĆ *et al.*, 2017; ALI *et al.*, 2018). Essa área se torna um ponto de foco para o ataque corrosivo e pode ser caracterizada por certas condições propícias à formação de uma pilha galvânica, como a diferença entre as características eletroquímicas da armadura de aço no concreto original e na área reparada, necessitando assim de reparos repetidos devido a ocorrência de falhas precoces (KAMDE *et al.*, 2021).

O ânodo incipiente é crítico no contexto de reparos de concreto armado porque, se não for tratado adequadamente, pode levar a problemas de durabilidade no futuro. Durante o reparo, é essencial identificar e tratar todas as áreas afetadas pela corrosão, o que geralmente envolve a remoção completa da área corroída, preparação adequada da superfície e aplicação de medidas protetivas, como a aplicação de revestimentos, uso de ânodos galvânicos ou mesmo inibidores de corrosão.

Com esse intuito, os reparos localizados em elementos estruturais são uma técnica comumente

encontrada em edificações no Brasil. A técnica tem como objetivo interromper a pilha eletroquímica gerada ao longo da vida útil da peça e restaurar a camada passivadora do aço através da aplicação de concreto novo, graute ou argamassa de reparo. Apesar da execução adequada do reparo, é possível verificar a corrosão do aço na interface entre o concreto e a argamassa de reparo (MEDEIROS, DASCHEVI, ARAÚJO, 2022). A Figura 1 apresenta o efeito do ânodo incipiente em ensaios de potencial de corrosão em elementos estruturais.

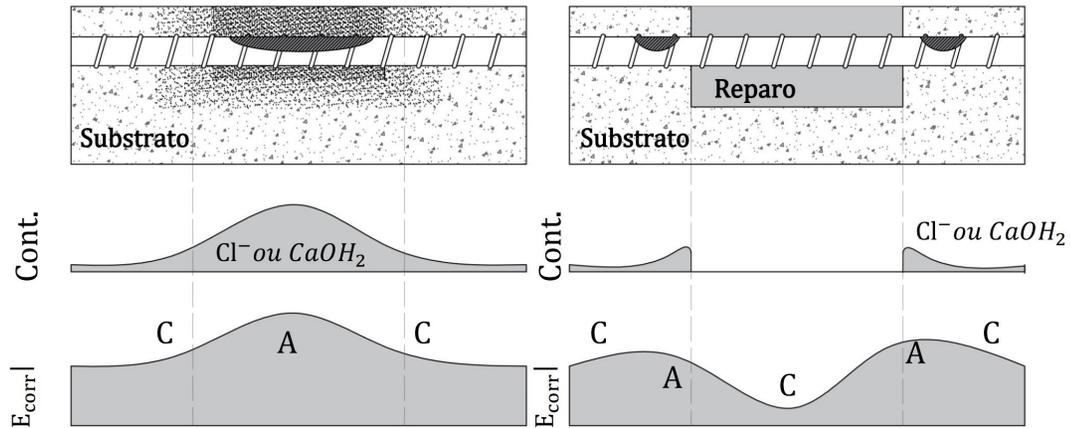


Figura 1. Configurações clássicas da variação do potencial de corrosão quando ocorre a formação de ânodos incipientes em elementos reparados.

Fonte: MEDEIROS, DASCHEVI e ARAÚJO (2022).

Pode-se verificar que, na primeira situação, a armadura está corroendo no meio da armadura, e, devido a isso, o potencial de corrosão (em módulo) nessa região é maior do que nas demais. No entanto, no segundo caso, a interface em que foi realizado o reparo apresenta picos de potencial de corrosão, enquanto no meio do reparo a armadura estaria em condição passiva.

Desse modo, o uso de materiais de reparo apropriados pode permanentemente diminuir o potencial de corrosão do aço dentro da área de reparo. As razões para isso seriam a permeabilidade tipicamente baixa e o alto pH desses materiais. Um alto pH na área recém-reparada resulta em uma mudança negativa, pois os potenciais de equilíbrio do aço no concreto seriam mais negativos do que na região recém-reparada (CHRISTODOULOU, 2013).

Dessa forma, a detecção precoce de ânodos incipientes é fundamental para a manutenção e conservação de estruturas de concreto armado, uma vez que medidas corretivas podem ser tomadas para interromper o processo corrosivo antes que cause danos significativos. Isso pode envolver a aplicação de revestimentos protetores, proteção catódica, reparo das áreas corroídas com argamassa e controle do ambiente.

3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

3.1 Caracterização dos materiais

O cimento Portland utilizado no programa experimental foi o do tipo CP V – ARI para o concreto e as argamassas de reparo. Este cimento segue as exigências estabelecidas na NBR 16697 (ABNT, 2018). A Tabela 1 mostra os dados da caracterização química, física e mecânica deste cimento.

Tabela 1. Caracterização química, física e mecânica do cimento CP V – ARI.

Composição química (%)										
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	MgO	CaO Livre	Equivalent e Alcalino	Resíduo Insolúvel	Perda Fogo	
62,20	19,8 2	4,49	3,05	2,74	2,02	1,02	0,66	0,63	3,41	
Expan. Quente (%)	Pega (min)		Finura pelo método Blaine (cm ² /g)	#200 (%)	#325 (%)	Resist. à compressão (MPa)				Massa espec. (g/cm ³)
	Inicial	Final				1 dia	3 dias	7 dias	28 dias	
0,18	217	267	4366	0,05	0,35	23,4	38,1	44,5	52,5	3,09

Fonte: Fabricante.

Como adição pozolânica, utilizou-se a sílica de casca de arroz (SCA), quimicamente caracterizada na Tabela 2. Esta adição mineral foi obtida a partir da queima controlada em sistema de leito fluidizado, com o objetivo de produzir um material com pozolanicidade otimizada. Para mensurar a capacidade pozolânica desta adição, foi realizado o ensaio de Chapelle Modificado, conduzido em conformidade com a NBR 15895 (ABNT, 2010), que estabelece como condição para classificação de uma pozolana que o consumo mínimo de hidróxido de cálcio consumido seja de 436 mg Ca(OH)₂/g de adição.

Neste caso, a sílica de casca de arroz fixou a cal em 1336 mg Ca(OH)₂/g amostra, muito acima no limite mínimo estabelecido na NBR 15895 (ABNT, 2010), o que leva a classificar este material como de alta reatividade.

Tabela 2. Propriedades químicas da sílica de casca de arroz (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	Sup. BET	Massa esp. (g/cm ³)	Chapelle modificado (mg Ca(OH) ₂ /g de adição)
0,43	88,47	2,72	0,05	-	1,55	1,46	0,49	4,84	14,692	2,12	1336
*CuO, ZnO, MnO, P ₂ O ₅ , Tm ₂ O ₃ e Rb ₂ O											

A Figura 2 mostra o difratograma de raios X, que indica a presença de parcela mineral no estado amorfo, com picos de fase cristalina de cristobalita, além da existência de um halo amorfo, típico de material pozolânico.

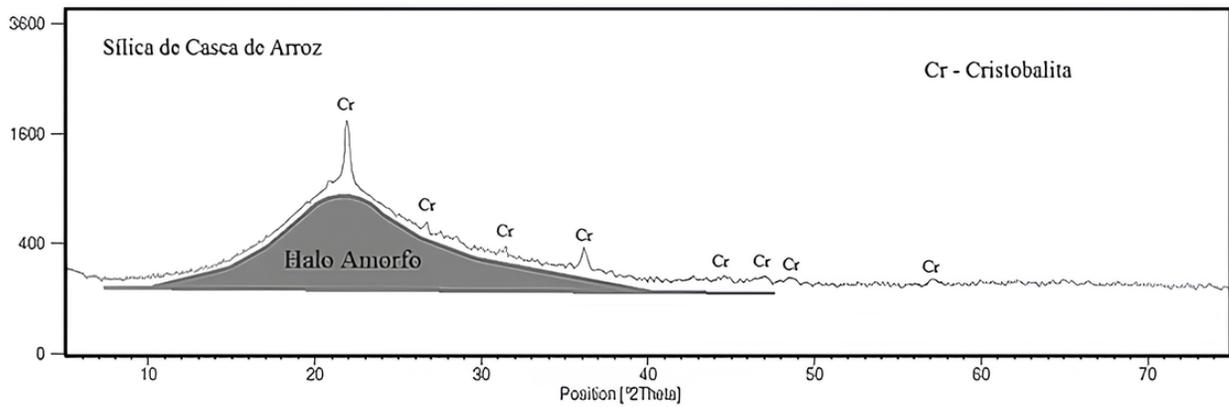


Figura 2. Difratoograma de raios X da adição mineral sílica de casca de arroz.

Como agregado miúdo e graúdo utilizaram-se, respectivamente, areia natural e pedrisco de origem basáltica (brita n.º “0”, $d_{máx} = 9,5$ mm). Os dados de granulometria da NBR NM 248 (ABNT, 2003a) constam na Figura 3, evidenciando o cumprimento dos requisitos da NBR 7211 (ABNT, 2009).

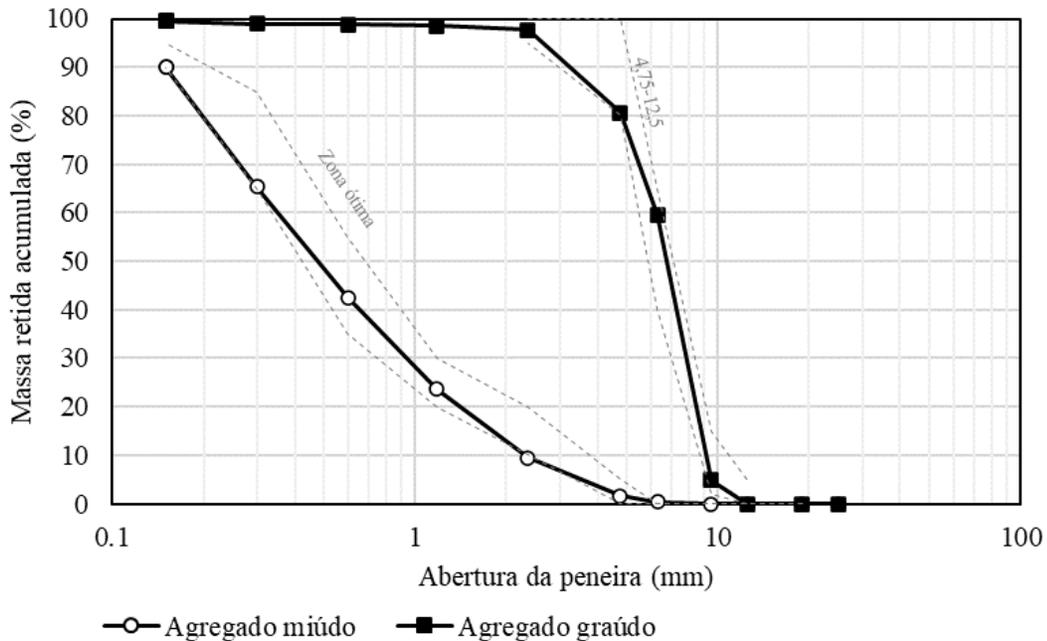


Figura 3. Curvas granulométricas dos agregados miúdo e graúdo.

A Tabela 3 mostra os dados de teor de material pulverulento conforme a NBR NM 46 (ABNT, 2003b); massa específica conforme a NBR NM 52 (ABNT, 2003c) para agregado miúdo e a NBR NM 53 (ABNT, 2006a) para agregado graúdo; massa unitária conforme a NBR NM 45 (ABNT, 2006b); e absorção conforme a NBR NM 30 (ABNT, 2001). Embora o teor de materiais pulverulentos tenha ficado acima dos limites para agregados miúdos e graúdos, 5% e 1% respectivamente, entendeu-se que essa característica não iria interferir nos objetivos deste estudo.

Tabela 3. Caracterização dos agregados usados no concreto e argamassas.

Propriedade	Norma	Agregado Miúdo	Agregado Graúdo
Módulo de finura	NBR NM 248	2,33	5,79
Dimensão máxima característica (mm)	NBR NM 248	4,75	9,5
Massa unitária (g/cm ³)	NBR NM 45	1,60	2,39
Classificação	NBR 7211	Zona ótima	4,15 – 12,5
Massa específica (g/cm ³)	NBR NM 52 e 53	2,510	2,747
Absorção de água	NBR NM 30	1,57%	1,59%
Teor de materiais pulverulentos	NBR NM 46	5,33%	7,11%

Devido à baixa relação a/c usada nas argamassas de reparo, adicionou-se o aditivo superplastificante PowerFlow 1180 da MC-Bauchemie, base polímeros policarboxilatos, com densidade $1,09 \text{ kg/L}$ e dosagem recomendada de 0,2% a 5,0% em relação à massa de cimento.

3.2 Processo de produção dos corpos de prova de concreto armado

Para o desenvolvimento experimental do estudo, foram realizados ensaios de potencial de corrosão e resistividade elétrica superficial. Esses ensaios foram aplicados a corpos de prova prismáticos que simulam uma peça de concreto reparada, conforme ilustrado na Figura 4.

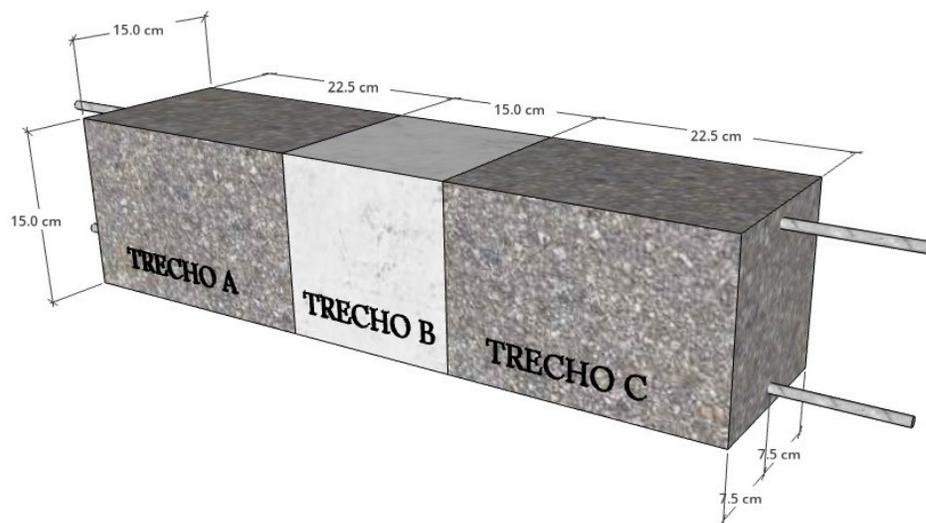


Figura 4. Corpo de prova prismático de concreto armado reparado com argamassa para a realização do ensaio de verificação da formação de ânodos incipientes.

Conforme ilustrado na Figura 2, a peça de concreto armado utilizada para a análise foi segmentada em três trechos: Trecho A, Trecho B e Trecho C. Essa segmentação foi realizada para distinguir as regiões não reparadas das regiões reparadas durante a realização dos ensaios. O Trecho A e o Trecho C correspondem às regiões não reparadas, enquanto o Trecho B corresponde à região com reparo estrutural.

Os elementos prismáticos foram moldados com dimensões de $15 \times 15 \times 60 \text{ cm}$ e foram utilizados por Daschevi (2022) em sua dissertação de mestrado. O concreto foi moldado com cimento Portland CPV – ARI e com uma proporção de mistura, em massa, de 1:2,17:2,94:0,6 (cimento: areia: brita: relação água/cimento), com um consumo de cimento de 358 kg/m^3 e teor de argamassa

de 51% com vistas à obtenção de uma resistência característica (f_{ck}) de 30 MPa aos 28 dias. Desse modo, este concreto apresentou resistência à compressão média de 37 MPa, módulo de elasticidade de 28 GPa e absorção por imersão de 5,2%.

Além disso, considerou-se uma condição de contaminação do concreto por cloreto (Cl^-) de 1,4%, em relação à massa de cimento, que foi adicionado na forma de NaCl durante a mistura do concreto na betoneira. Esse percentual corresponde ao dobro do valor usado por Castro *et. al.* (2003), visando garantir a despassivação das armaduras.

Para a argamassa de reparo utilizou-se quatro proporções de mistura:

- Proporção de mistura SCA (0%): 1:3:0,4 (cimento: areia: relação água/cimento).
- Proporção de mistura SCA (10%): 0,90:0,10:3:0,4 (cimento: SCA: areia: relação água/cimento).
- Proporção de mistura SCA (15%): 0,85:0,15:3:0,4 (cimento: SCA: areia: relação água/cimento).
- Proporção de mistura SCA (20%): 0,80:0,20:3:0,4 (cimento: SCA: areia: relação água/cimento).

O índice de consistência da argamassa foi fixado foi $200 \text{ mm} \pm 10 \text{ mm}$, obtido mediante adição de 1,5%, em relação à massa de cimento, de aditivo superplastificante base polímeros policarboxilatos.

Este programa experimental também visou analisar uma condição em que não foi utilizado reparo. A Tabela 4 mostra as nomenclaturas adotadas para os corpos de prova examinados.

Tabela 4. Nomenclaturas e especificações para os corpos de prova.

Corpo de Prova	Reparo	Adição	Substrato
SCA (0%) – S/ Cl^-	Sim	0%	Sem Cl^-
SCA (10%) – S/ Cl^-	Sim	10%	Sem Cl^-
SCA (15%) – S/ Cl^-	Sim	15%	Sem Cl^-
SCA (20%) – S/ Cl^-	Sim	20%	Sem Cl^-
SCA (0%) – C/ Cl^-	Sim	0%	1,4% de Cl^-
SCA (10%) – S/ Cl^-	Sim	10%	1,4% de Cl^-
SCA (15%) – S/ Cl^-	Sim	15%	1,4% de Cl^-
SCA (20%) – C/ Cl^-	Sim	20%	1,4% de Cl^-
Sem reparo – S/ Cl^-	Não	-	Sem Cl^-
Sem reparo – C/ Cl^-	Não	-	1,4% de Cl^-

As barras de aço adotadas foram de CA-50, com diâmetro de 8 mm, comprimento de 70 cm e cobrimento nominal de 1 cm. Antes da moldagem, todas foram previamente limpas em solução de ácido clorídrico e a hexametilenotetramina, conforme procedimento da ASTM G-1 (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. Além disso, as regiões externas das barras foram isoladas, e nelas foram soldados fios condutores. No outro lado do fio, foi soldado um terminal eletrônico para a conexão com o aparelho de medição do potencial de corrosão.

3.3 Potencial de corrosão (E_{corr})

Conforme Romano, Brito e Rodrigues (2013), o potencial de corrosão de uma armadura presente no concreto armado é caracterizado por ser um potencial misto, ou seja, o resultado da combinação cinética de pelo menos dois processos: a oxidação anódica do aço e a redução do oxigênio dissolvido. O ensaio de potencial de corrosão mede a diferença de potencial entre o aço presente

na estrutura de concreto armado e um eletrodo de referência, que é capaz de manter seu potencial fixo e serve como ponto de comparação (MEDEIROS *et al.*, 2013; MEDEIROS *et al.*, 2017).

Para a realização dos ensaios, foi utilizada a norma ASTM C 876 (ASTM, 2015). Inicialmente, essa norma especifica que não aborda regiões em que o concreto esteja localizado em interiores de edifícios e estruturas situadas no deserto, pois a estrutura pode perder umidade e influenciar na resistividade do concreto, tornando-a muito alta.

Nesse sentido, os corpos de prova foram deixados em um taque com água para evitar resultados equivocados. Considerando a necessidade de o concreto estar úmido, a água presente na porosidade capilar do concreto armado funciona como um condutor e, dessa forma, contribui para a formação de diferenças de potencial ao longo da superfície do aço em função do agente agressivo presente (SONG, SARASWARHY, 2007 *apud* MEDEIROS *et al.*, 2017).

Dessa forma, a configuração adotada para a realização do ensaio de potencial de corrosão incluiu um voltímetro, um eletrodo de referência de cobre/sulfato de cobre, condutores que atuam como conexão negativa e positiva, e uma esponja úmida. A Figura 5 mostra o sistema de medição montado para este experimento.



Figura 5. Apararelhagem para a realização dos ensaios de potencial de corrosão (E_{corr}).

Foram realizados sete pontos de inspeção de potencial de corrosão na superfície do corpo de prova, sendo quatro pontos sobre a área sem reparo, dois pontos na interface entre o reparo e o concreto, e um ponto no meio da peça. O mesmo procedimento foi adotado para as amostras sem reparo. A configuração adotada para a realização dos ensaios pode ser observada na Figura 6.

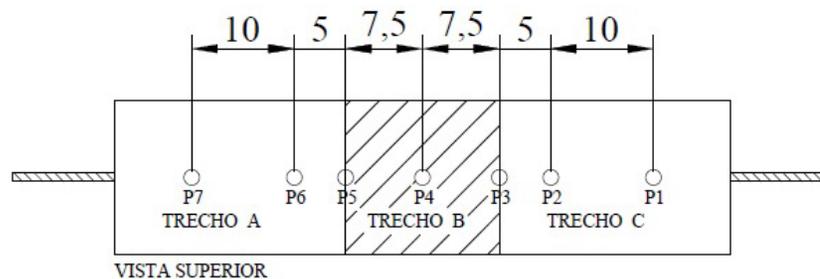


Figura 6. Pontos de análise para o potencial de corrosão

Através dos dados obtidos, pode-se verificar a probabilidade de corrosão através da Tabela 5 conforme apresentado na norma ASTM C 876 (ASTM, 2015).

Tabela 5. Probabilidade de corrosão por meio do potencial de corrosão da armadura (PCA) no Corpo de Prova para leituras usando o eletrodo de Cobre/sulfato de cobre.

Valor encontrado	Probabilidade de corrosão
PCA > - 200 mV	<10%
-350 mV < PCA < - 200 mV	Incerto
PCA < - 350 mV	>90%

Fonte: ASTM C 876 – 2015 (ASTM, 2015).

Além disso, o ensaio de potencial de corrosão foi executado tanto na barra superior quanto na barra inferior de cada corpo de prova.

3.4 Resistividade elétrica superficial

Para obter os valores de resistividade elétrica superficial do concreto, foi utilizado o Método dos Quatro Eletrodos, também conhecido como Método de Wenner, que é amplamente utilizado em experimentos envolvendo estudos de durabilidade do concreto (HORNBOSTEL *et al.*, 2013; MEDEIROS JUNIOR *et al.*, 2014; MEDEIROS JUNIOR *et al.*, 2019; WOSNIAK *et al.*, 2021; ARAÚJO *et al.*, 2022). Esse método foi inicialmente desenvolvido para determinar a resistividade elétrica do solo (SILVA, 2016).

Para realizar o ensaio de resistividade elétrica superficial, foi utilizado o equipamento Resipod da marca Proceq. O ensaio consiste em colocar quatro eletrodos sobre a superfície do concreto. Os eletrodos nas extremidades do equipamento emitem uma corrente elétrica que pode ser alternada ou contínua, com frequência de 40 Hz. Conforme o fabricante, a variação do valor da corrente pode ser entre 10 µA e 200 µA. Com isso, os dois eletrodos internos medem a diferença de potencial (ddp) resultante da corrente aplicada pelos eletrodos externos. A resistividade elétrica é determinada pela (01) desenvolvida por Wenner.

$$\rho = 2\pi a \frac{V}{I} \tag{1}$$

Onde:

ρ = Resistividade elétrica do concreto ($\Omega.m$);

a = Distância média entre os eixos dos eletrodos (m);

V = Diferença de potencial entre os eletrodos internos (V);

I = Corrente Elétrica (A).

Desse modo, foram realizadas duas verificações da resistividade elétrica superficial do concreto por trecho da amostra, tanto na parte da superfície superior, quanto na inferior. A Figura 7 apresenta os pontos analisados.

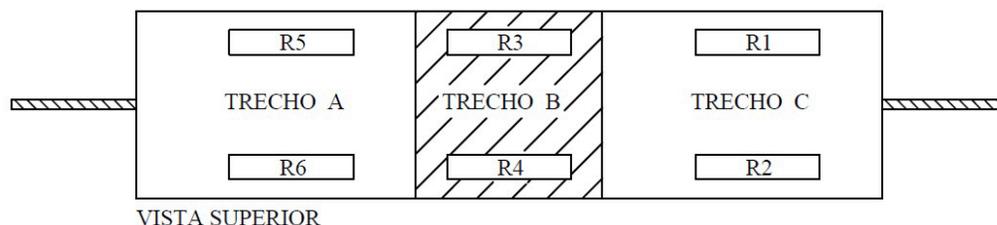


Figura 7. Pontos de análise de resistividade elétrica do concreto.

Através dos resultados obtidos, utilizou-se a Tabela 6 que consta na Norma Europeia CEB 192 (CEB, 1989) para a verificação se a estrutura sofre algum risco de corrosão:

Tabela 6. Probabilidade de risco de corrosão.

Resistividade elétrica do concreto	Probabilidade de corrosão
$p > 20 \text{ kohm x cm}$	Desprezível
$10 < p < 20 \text{ kohm x cm}$	Baixa
$5 < p < 10 \text{ kohm x cm}$	Alta
$p < 5 \text{ kohm x cm}$	Muito Alta

Fonte: CEB 192 (CEB, 1989).

É importante destacar que, embora seja uma técnica simples e amplamente utilizada, o Método dos Quatro Eletrodos deve ser aplicado com cuidado para evitar influências de fatores externos, como o formato da amostra a ser ensaiada, a região de contato entre os eletrodos e o concreto, a heterogeneidade do concreto, o tipo de onda elétrica, a frequência e a intensidade da corrente aplicada. Esses fatores podem impactar na precisão das medições. Considerando a metodologia utilizada, nos próximos tópicos serão apresentados os resultados obtidos através dos ensaios.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A corrosão em elementos de concreto armado pode levar a uma redução na capacidade de carga devido à diminuição da área da seção transversal do aço e ao desenvolvimento de fissuras nos compósitos cimentícios. Visto isso, os reparos de corrosão e a limpeza adequada da armadura são essenciais para prevenir a recorrência dessa manifestação patológica e a formação de ânodos incipientes. Dada a discussão limitada sobre este tópico na literatura científica (Castro *et al.*, 2003; Christodoulou *et al.*, 2013; Luković *et al.*, 2017; Ali *et al.*, 2018), nenhum estudo abordou o uso da sílica de casca de arroz em reparos com argamassa e se isso poderia causar a formação de ânodos incipientes nas áreas reparadas. Portanto, o presente estudo buscou investigar as diferenças eletroquímicas causadas pelo uso da sílica de casca de arroz em reparos com argamassa e se isso poderia potencialmente contribuir para a formação de ânodos incipientes em concreto armado. As propriedades analisadas incluíram características físicas (resistividade elétrica, módulo de elasticidade e resistência à compressão) e propriedades físico-químicas (potencial de corrosão). Os resultados obtidos para cada teste são apresentados nas seções seguintes.

4.1 Características do substrato e das argamassas de reparo

Para fins de comparação com as características das argamassas usadas como reparo, o concreto do substrato apresenta resistência média de 37 MPa (desvio padrão = 1,5 MPa) e módulo de elasticidade médio de 28 GPa (desvio padrão = 1,0 GPa).

A Figura 8 mostra a variação da resistência à compressão das argamassas com a variação do teor de SCA. Deve-se destacar que a argamassa com 10% de substituição parcial de cimento por SCA apresentou um aumento na resistência à compressão de 11,6% em relação à argamassa de referência. No caso dos percentuais de substituição de 15% e 20%, observou-se uma redução na resistência de 10,0% e 43,6%, respectivamente, em relação à argamassa de referência.

De forma geral, pode-se afirmar que houve uma tendência de redução na resistência com o aumento do teor de substituição parcial de cimento por SCA.

Comparando os dados de resistência com o concreto do substrato que recebeu o reparo (37 MPa), é importante observar que a argamassa com 20% de SCA foi a única que apresentou resistência à compressão inferior ao substrato.

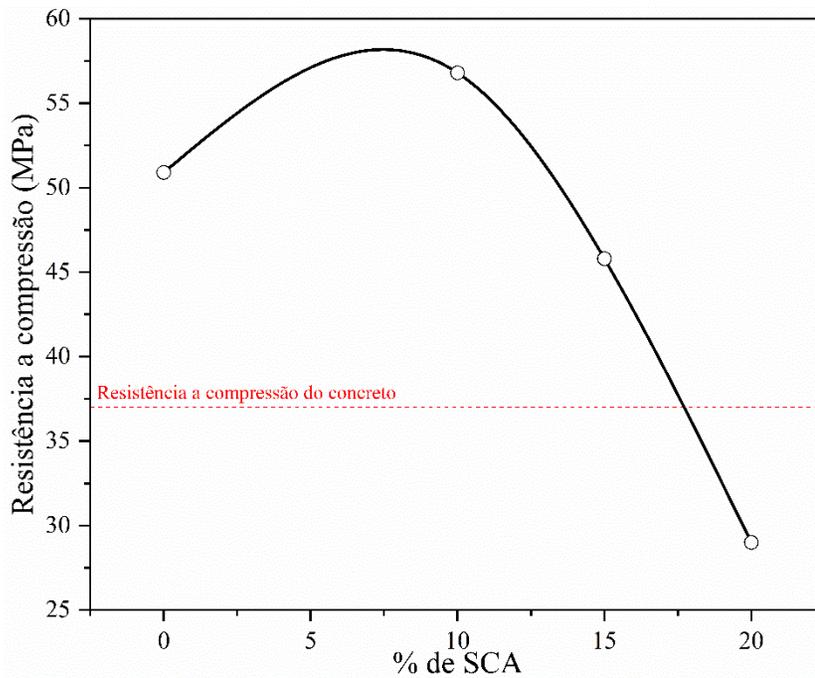


Figura 8. Resistência à compressão das argamassas em função do teor de SCA, medida em corpos de prova de 40 x 40 x 80 cm, aos 28 dias de cura.

A Figura 9 mostra a influência do teor de substituição parcial do cimento por SCA nos valores médios do módulo de elasticidade aos 28 dias. A análise estatística indicou que as médias de 0%, 10% e 15% não têm diferença significativa, sendo consideradas semelhantes. Por outro lado, o teor de 20% causou uma redução com significância estatística, representando uma diminuição de 5,6% em comparação com o teor de 0%. Deve-se notar que todas as argamassas apresentam módulo de elasticidade superior ao do substrato, que é de 28 GPa.

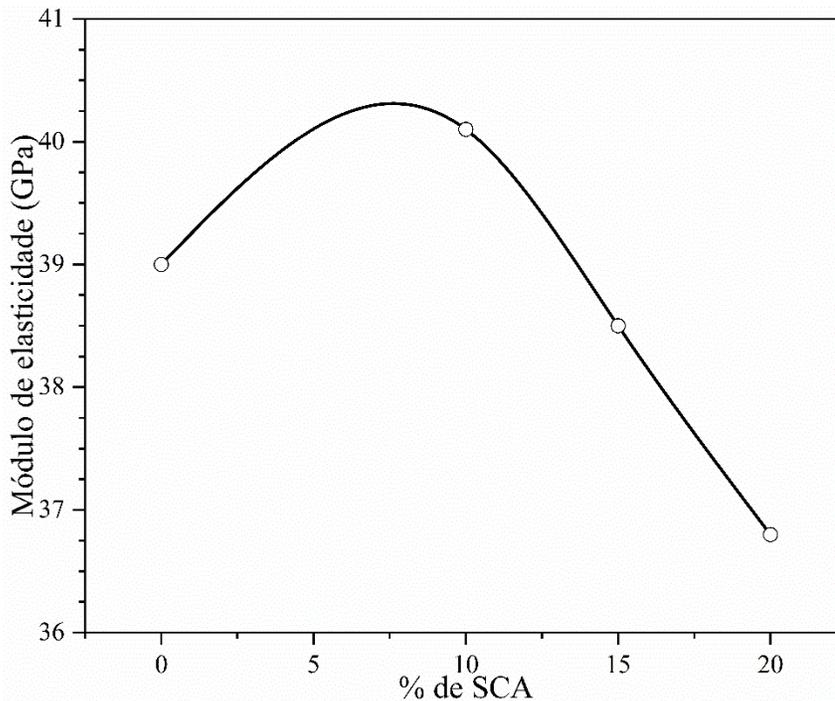


Figura 9. Módulo de elasticidade estático das argamassas em função do teor de SCA, medida em corpos de prova de 40 x 40 x 160 cm, aos 28 dias de cura.

4.2 Potencial de corrosão

O ensaio de potencial de corrosão é utilizado para avaliar a propensão de um material à corrosão em um ambiente ou condição específica. Os dados obtidos por meio desse ensaio foram transformados em médias aritméticas, uma vez que não foi observada uma grande variação do potencial de corrosão nos 7 pontos de inspeção ao longo da peça de concreto. A análise revelou um desvio padrão entre 3 e 10 e um coeficiente de variação de 1% a 9%. A Figura 10 mostra os valores de E_{corr} em função dos corpos de prova de cada série de ensaio.

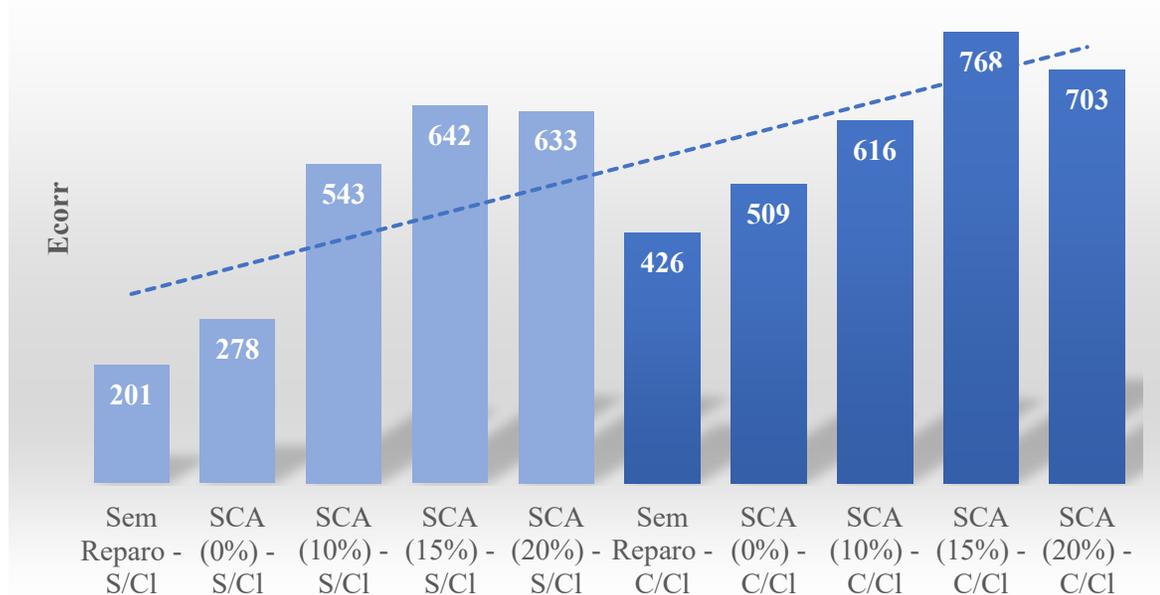


Figura 10. Potencial de corrosão utilizando eletrodo de referência de cobre/sulfato de cobre.

Para fazer uma análise da Figura 10, é didático interpretar por partes. Inicialmente, deve-se observar os corpos de prova sem reparo, com e sem contaminação por cloretos. Neste caso, fica evidente a influência da presença do contaminante, que torna os resultados mais eletronegativos na presença de íons cloreto. De acordo com a classificação da ASTM C 876 (ASTM, 2015), pode-se afirmar que o caso não contaminado tem menos de 10% de probabilidade de corrosão. No caso do concreto contaminado por cloretos, pode-se afirmar que existe mais de 90% de probabilidade de corrosão, de modo que a contaminação de 1,4% de cloreto em relação à massa de cimento causou mais de 100% de alteração dos valores do E_{corr} .

Observando a Figura 10 com foco apenas nas séries com contaminação por íons cloreto, observa-se que o reparo localizado não melhorou os valores de potencial de corrosão, mantendo as peças reparadas em valores de E_{corr} que indicam mais de 90% de probabilidade de corrosão. Isso significa que a execução do reparo localizado não garantiu a estagnação do processo de corrosão instalado, de modo que ele continua se desenvolvendo e avançando no concreto reparado. Além disso, analisando a Figura 10 e comparando o caso da argamassa de reparo modificada com uma pozolana de alta reatividade, os valores de E_{corr} ficaram ainda mais eletronegativos, variando entre 21% e 51% em comparação com o reparo de argamassa sem SCA. Este é um alerta, pois o uso de uma pozolana, que normalmente se espera que melhore o reparo, pode significar uma piora de desempenho nas condições de serviço.

Analisando a Figura 10 com foco nas séries sem a contaminação por cloretos, deve-se destacar o fato de que a introdução do reparo gera algum tipo de distúrbio eletroquímico que faz as peças de concreto reparadas apresentarem E_{corr} mais eletronegativos em comparação com a série sem

reparo e sem cloretos. Deve-se destacar a série SCA (15%) – S/Cl cujo valor de E_{corr} foi de -642 mV, 219% mais eletronegativo do que a peça sem reparo e sem cloretos.

Uma explicação para o aumento da eletronegatividade de E_{corr} com o uso de SCA nas argamassas é o fato de que esta pozolana de alta reatividade consome consideravelmente a portlandita resultante do processo de hidratação do cimento, conforme demonstrado no trabalho de Hoppe Filho *et al.* (2017) e Campos, Medeiros e Hoppe Filho (2022). No entanto, é interessante frisar que o silicato de cálcio hidratado formado através da reação pozolânica apresenta uma menor densidade que o C-S-H formado durante o processo de hidratação do cimento Portland (RIBEIRO, 2018). Nesse sentido, existe a probabilidade de que, ao utilizar SCA, a portlandita responsável pelo pH elevado da argamassa tenha sido consumida, gerando uma redução no pH da argamassa de reparo e causando uma incompatibilidade eletroquímica com o concreto do substrato.

O pH do ambiente tem um grande impacto no equilíbrio dos potenciais, sendo que um pH elevado resulta em potenciais de equilíbrio mais eletronegativos. Um aumento do pH em apenas uma unidade na região alcalina no concreto resulta em uma mudança mais negativa de 60 mV nos potenciais de equilíbrio entre o aço e os produtos, assim como nos potenciais de equilíbrio para as reações de oxigênio e hidrogênio (POURBAIX, 1990 *apud* CHRISTODOULOU *et al.*, 2013).

4.3 Resistividade elétrica superficial

A Figura 11 e 12 mostra os dados obtidos para a resistividade elétrica superficial dos materiais que compõem os corpos de prova de concreto armado reparados. Deve-se destacar que as resistividades elétricas superficiais das argamassas de reparo são superiores em relação ao substrato de concreto, e essa diferença pode ser um fator desencadeador da formação de ânodos incipientes.

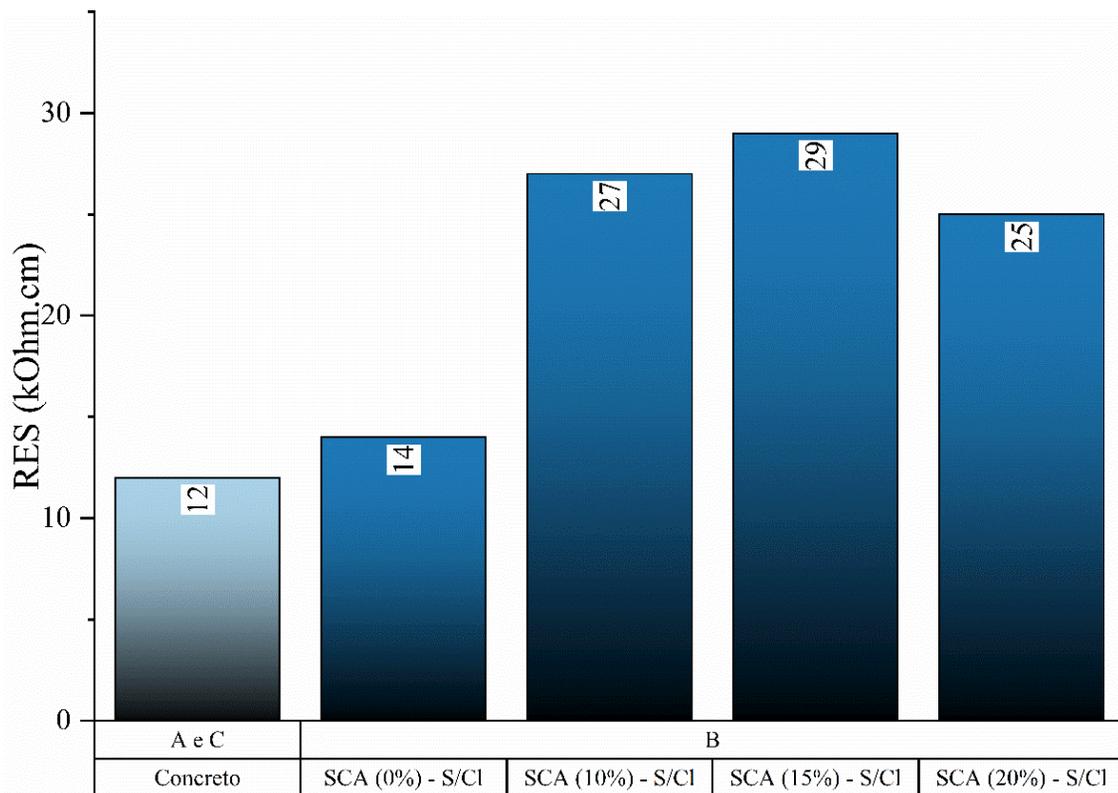


Figura 11. Resistividade elétrica superficial (RES) das amostras sem cloretos.

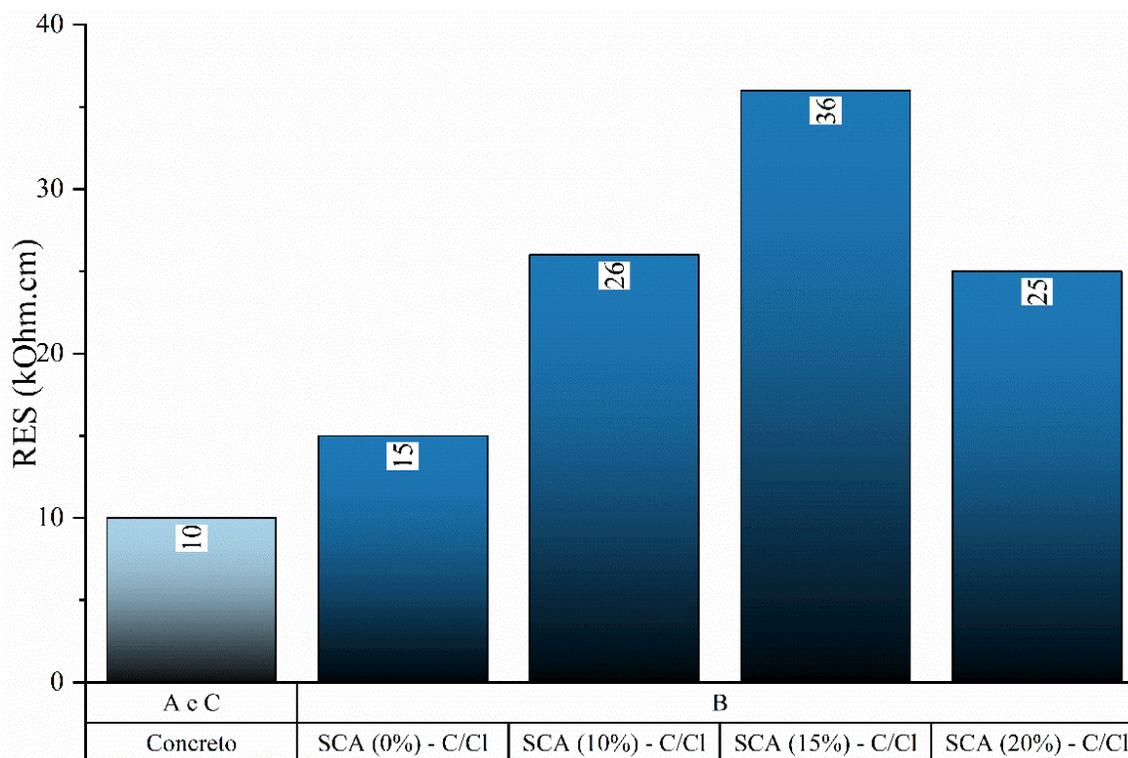


Figura 12. Resistividade elétrica superficial (RES) das amostras com cloretos.

Os resultados encontrados para a resistividade elétrica superficial (RES) estão alinhados com os obtidos no estudo desenvolvido por Wosniack *et al.* (2021) e Araújo, Macioski e Medeiros (2022), que também observaram maiores valores de resistividade elétrica para concretos moldados com sílica de casca de arroz em comparação aos concretos sem essa adição. A resistividade elétrica do concreto está relacionada à matriz da microestrutura do cimento, incluindo as estruturas dos poros, a porosidade e sua distribuição. Essas propriedades são controladas pelo grau de hidratação do cimento (POLDER, 2001, *apud* SILVA, FERREIRA, FIGUEIRAS, 2011). Por esse motivo, observa-se altos valores de resistividade elétrica superficial para as argamassas de reparo com adição de sílica de casca de arroz, em comparação com o concreto do substrato e a argamassa sem adição de SCA.

Nesse sentido, conforme Wosniack *et al.* (2021), a atividade pozolânica impacta na resistividade elétrica superficial do concreto, refinando os poros e contribuindo para uma pasta mais densa. Outro efeito da adição pozolânica relatado nos trabalhos de Medeiros *et al.* (2013) e Medeiros Junior, Munhoz e Medeiros (2019) que impacta na resistividade elétrica dos compósitos cimentícios é o consumo de hidróxido de cálcio na reação pozolânica, de modo que a solução de poros do concreto se torna menos concentrada em íons Ca^{2+} e OH^- e conseqüentemente menos condutiva, ou mais resistiva. Esses argumentos explicam o fato de os valores de resistividade elétrica nas argamassas com SCA serem muito superiores aos dos materiais sem SCA (argamassa de referência e concreto do substrato).

No entanto, é importante frisar que, conforme determinado por Hoppe Filho *et al.* (2017), que analisaram o índice de atividade pozolânica com cal segundo a NBR 5751 (ABNT, 2015), a sílica de casca de arroz apresenta menor cinética de atividade pozolânica se comparada à sílica ativa e ao metacaulim. Dessa forma, caso fossem utilizadas outras adições, seriam verificados outros valores de resistividade elétrica superficial para a argamassa de reparo.

Voltando a este trabalho, que trata dos corpos de prova de concreto reparado, no caso de argamassa de reparo sem adição de sílica de casca de arroz, os valores da resistividade elétrica superficial foram 17% maiores na região com reparo do que na região de concreto do substrato. Isso se deve

ao fato de a argamassa de reparo apresentar uma relação água/cimento (a/c) menor do que o concreto do substrato (regiões vizinhas). De acordo com os resultados obtidos por Chen e Wu (2013), a porosidade aumenta conforme se aumenta a relação a/c e, de acordo com Medeiros Junior, Munhoz e Medeiros (2019), a resistividade diminui à medida que se aumenta a relação a/c. Dessa forma, os dados obtidos na campanha experimental são coerentes, de modo que a resistividade elétrica superficial da argamassa de reparo sem SCA é maior, pois se tem uma mistura mais densa. Porém, pelos efeitos já explicados anteriormente, a adição de SCA causa uma maior diferença de RES entre o substrato reparado e a argamassa de preenchimento do reparo. Sobre este tema, a Figura 12 mostra que as argamassas com SCA, conseqüentemente com maior diferença de RES entre o substrato e a argamassa, são as que resultam em valores mais eletronegativos do sistema reparado, indicando maior tendência à corrosão devido a incompatibilidade eletroquímica entre as regiões.

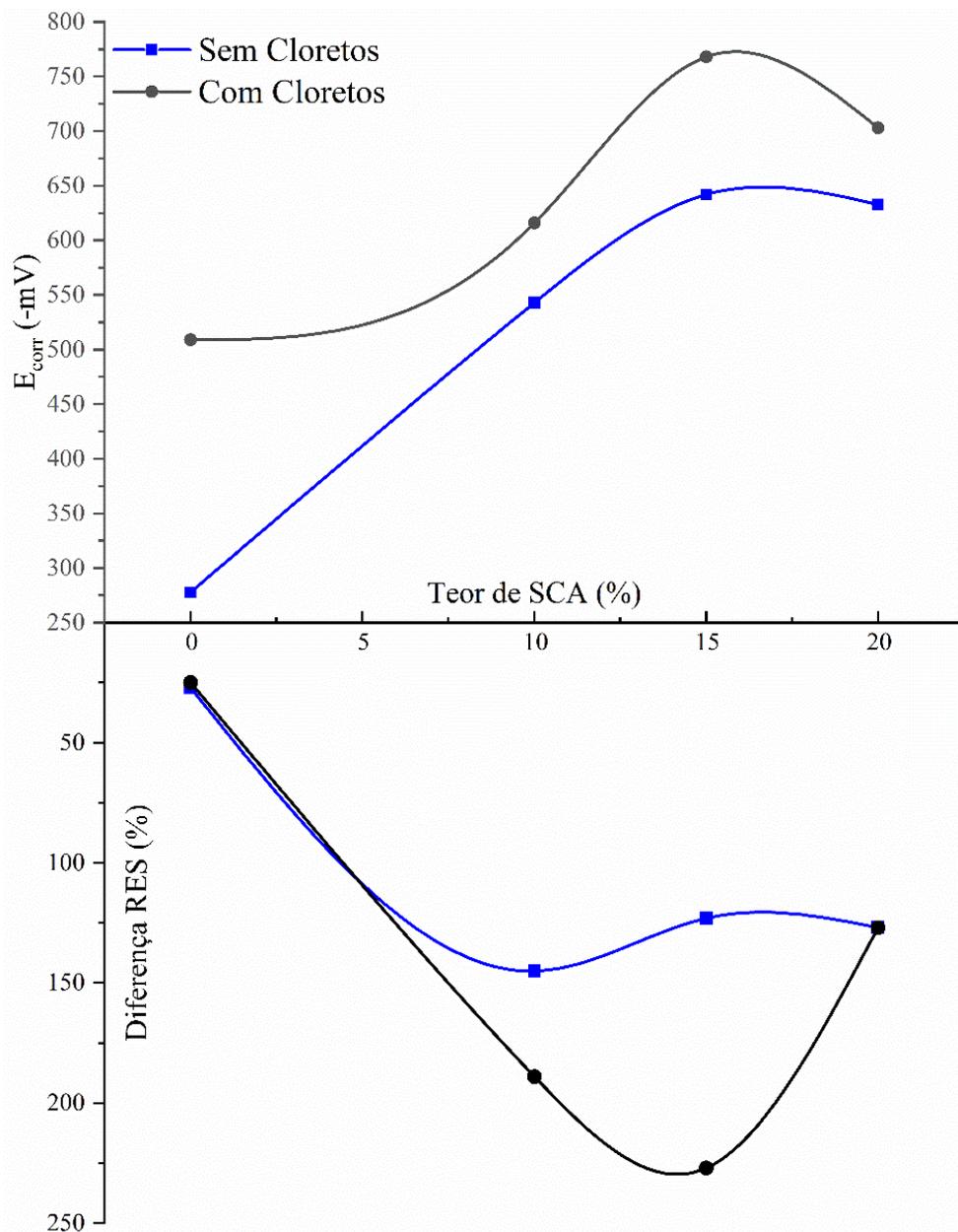


Figura 12. Relação entre o teor de SCA, E_{corr} e a diferença de RES entre o concreto do substrato e a argamassa de reparo.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir do plano experimental desenvolvido neste trabalho, podem ser feitas as seguintes considerações:

- A adição de sílica de casca de arroz (SCA) causou um aumento da resistividade elétrica das argamassas de reparo, com aumentos variando entre 67% e 140% em comparação com a argamassa sem SCA.
- Verifica-se que, apenas com os dados de potencial de corrosão, não seria possível afirmar a existência do fenômeno do ânodo incipiente, pois o potencial de corrosão do aço apresentou pouca variação dentro e fora do reparo.
- Avaliando os dados de resistividade elétrica superficial, é possível notar a diferença das propriedades entre a argamassa de reparo e o concreto, principalmente no caso da argamassa com adição de SCA.
- Deve-se destacar que, ao analisar a possibilidade da existência do ânodo incipiente em elementos estruturais, não se deve utilizar apenas um meio de ensaio, pois, com a presença de dados de diferentes experimentos, é possível ter mais segurança sobre a ocorrência do fenômeno. À vista disso, para garantir a ocorrência da corrosão nas amostras, seria necessário a inclusão das medições velocidade de corrosão e corrente galvânica.
- O reparo localizado introduzido nos corpos de prova causou uma movimentação dos potenciais de corrosão para valores mais eletronegativos, indicando a probabilidade de corrosão ativa, mesmo nos casos em que o substrato não estava contaminado por cloretos.
- A conclusão principal deste trabalho é que a adição de sílica de casca de arroz na argamassa de reparo resultou em maiores diferenças de resistividade elétrica superficial entre a área reparada e os trechos de substrato de concreto, fazendo com que os valores de potencial de corrosão das peças reparadas sejam mais eletronegativos, indicando tendência de falha por corrosão de armaduras causada pela formação de ânodos incipientes.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores expressam sua gratidão às agências brasileiras CNPq, Capes e Fundação Araucária pela bolsa e apoio financeiro, à Universidade Federal do Paraná (UFPR) campus Curitiba, Centro Politécnico, ao Departamento de Construção Civil (DCC), ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC), ao Centro de Estudos de Engenharia Civil (CESEC), ao Laboratório de Materiais e Estruturas (LAME), ao grupo de pesquisa de Patologia e Recuperação das Construções (PRC), assim como ao Grupo Pilecco Nobre e à Cia. de Cimentos Itambé, pela doação de materiais para a pesquisa.

7. REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2015), NBR 5751 – Materiais pozolânicos – Determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2018), *NBR 16697 - Cimento Portland - Requisitos*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2010), *NBR 15895: Materiais pozolânicos – Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – Método Chapelle modificado*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009), *NBR 7211 - Agregados para concreto - Especificação*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2001), *NBR NM 30 - Agregado miúdo - Determinação da absorção de água*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2006b), *NBR NM 45 - Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2003b), *NBR NM 46 - Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2003c), *NBR NM 52 - Agregados miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2006a), *NBR NM 53 – Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2003a), *NBR NM 248 - Análise Granulométrica*. Rio de Janeiro.

American Society for Testing and Materials (1999), *ASTM G1 - Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluation Corrosion Test Specimens*. Philadelphia.

American Society for Testing and Materials (2015), *ASTM C-876: Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete*. Philadelphia.

Ali, M. S. et al. (2018), *An experimental study of electrochemical incompatibility between repaired patch concrete and existing old concrete*. *Construction and Building Materials*, v. 174, p. 159-172. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.059>

Araújo, E. C., Macioski, G., De Medeiros, M. H. F. (2022), *Concrete surface electrical resistivity: Effects of sample size, geometry, probe spacing and SCMs*. *Construction and Building Materials*, v. 324, p. 126659. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126659>

Campos, P. A., Medeiros, M. H. F., Filho, J. H. (2022), *Ação conjugada de sílica de casca de arroz e hidróxido de cálcio em compósitos de cimento Portland: porosidade, compostos hidratados, reserva alcalina, e resistência à compressão*. *Revista Matéria*, v. 27, n.03. <https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2022-0018>

Castro, P., Pazini, E., Andrade, C., Alonso, C. (2003), *Macrocell activity in slightly chloride-contaminated concrete induced by reinforcement primers*. *Corrosion*, v. 59, n. 6, p. 535–546. <https://doi.org/10.5006/1.3277585>

Comité Euro-Internacional du Béton (1989), *Nº 192: diagnosis and assessment of concrete structures: state-of-art report*. Switzerland: FIB – International Federation for Structural Concrete.

Chen, X., Wu, S. (2013), *Influence of water-to-cement ratio and curing period on pore structure of cement mortar*. *Construction and Building Materials*, v.38, p. 804-812. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.058>

Christodoulou, C., et al. (2013), *Diagnosing the cause of incipient anodes in repaired reinforced concrete structures*. *Corrosion Science*, v. 69, p. 123 – 129. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2012.11.032>

Daschevi, P. A. (2022), *‘Efeito do ânodo incipiente em reparos localizados utilizando argamassas com substituição parcial de ligante por sílica de casca de arroz’*. Tese de mestrado, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

Hoppe Filho, J. et al. (2017), *Atividade pozolânica de adições minerais para cimento Portland (Parte I): Índice de atividade pozolânica (IAP) com cal, difração de raios-X (DRX), termogravimetria (TG/DTG) e Chapelle modificado*. *Revista Matéria*, v. 22, n. 03. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620170003.0206>

Hoppe Filho, J. et al. (2017), *Reactivity Assessment of Residual Rice-Husk Ashes*. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 1, p. 04017003. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.000182](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.000182)

Grandes Construções (2017), *Brasil perde 4% do PIB com corrosão*. *Revista Grandes Construções*.

Hornbostel, K., Larsen, C. K.; Geiker, M. R. (2013), *Relationship between concrete resistivity and corrosion rate—A literature review*. *Cement and concrete composites*, v. 39, p. 60-72. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.03.019>

- Kamde, D. K., et al. (2021), *Long-term performance of galvanic anodes for the protection of steel reinforced concrete structures*. Journal of Building Engineering, v. 42, p. 103049. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103049>
- Luković, M., et al. (2017), *Failure Modes in Concrete Repair Systems due to Ongoing Corrosion*. Hindawi, Advances in Materials Science and Engineering. <https://doi.org/10.1155/2017/9649187>
- Mehta, P. K., Monteiro, P. J. M. (2008), “*Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais*”. Ibracon.
- Medeiros, M. H. F., et al. (2013), *Inspection of Buildings in Rio de Janeiro-Brazil: Proving the greater tendency of corrosion at the base of reinforced concrete columns using potential corrosion technique*. American Journal of Engineering Research (AJER), v. 2, p. 102-112.
- Medeiros, M. H. F., et al. (2017), *Potencial de corrosão: influência da umidade, relação água/cimento, teor de cloretos e cobrimento*. Revista Ibracon de Estruturas e Materiais, v.10, p. 864-885. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952017000400005>
- Medeiros, M. H. F., et al. (2013), *High-Volume Fly Ash Concrete with and without Hydrated Lime: Chloride Diffusion Coefficient from Accelerated Test*. Journal of Materials in Civil Engineering, v. 25, p. 411 - 418. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.000059](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.000059)
- Medeiros, M. H. F., et al. (2017), *Corrosion potential: influence of moisture, water-cement ratio, chloride content and concrete cover*. REVISTA IBRACON DE ESTRUTURAS E MATERIAIS, v. 10, p. 864-885. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952017000400005>
- Medeiros, M. H. F., Daschevi, P. A., Araújo, E. C. (2022), *Reparo localizado para estruturas de concreto armado: erros, acertos e reflexões*. Concreto & Construções. <https://doi.org/10.4322/1809-7197.2022.106.0001>
- Medeiros Junior, R. A., et al. (2014), *Investigação da resistência à compressão e da resistividade elétrica de concretos com diferentes tipos de cimento*. Revista ALCONPAT, v. 4, p. 116-128. <https://doi.org/10.21041/ra.v4i2.21>
- Medeiros Junior, R. A., Munhoz, G. S., Medeiros, M. H. F. (2019), *Correlations between water absorption, electrical resistivity and compressive strength of concrete with different contents of pozzolan*. Revista ALCONPAT, v. 9, p. 152-166. <https://doi.org/10.21041/ra.v9i2.335>
- Nace International (2016), *International Measures of Prevention Application, and Economics of Corrosion Technologies Study*.
- Romano, P., Brito, P. S. D., Rodrigues, L. (2013), *Monitoring of the degradation of concrete structures in environments containing chloride ions*. Construction and Building Material, v. 47, p. 827 – 832. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.042>
- Silva, P. C., Ferreira, R. M., Figueiras, H. (2011), “*Electrical Resistivity as a Means of Quality Control of Concrete – Influence of Test Procedure*”. International Conference on Durability of Building Materials and Components.
- Silva, L. M. A. (2016), “*Resistividade elétrica superficial do concreto: influência da cura*”. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal de Goiás.
- Ribeiro, D. V. (2018), *Estruturas dos poros e mecanismos de transporte no concreto*. In: Ribeiro, D. V, et al. “*Corrosão e Degradação em Estruturas de Concreto*”. Rio de Janeiro: GEN, p. 51-93.
- Wosniack, L. M. et al. (2021), *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. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212021000300554>