

FATORES DE INFLUÊNCIA NO PROCESSO DE CORROSÃO EM CONCRETO ARMADO REPARADO COM ARGAMASSA CONTENDO SÍLICA DE CASCA DE ARROZ

Brito, Raphael Andrei Alves Brito ¹; Andrade, Théo Felipe de Andrade ²; Medeiros, Marcelo Henrique Farias de Medeiros ³

¹ Graduando em Engenharia Civil, Universidade Federal do Paraná (UFPR), raphael.brito@ufpr.br

² Graduando em Engenharia Civil, Universidade Federal do Paraná (UFPR), theo.felipe@ufpr.br

³ Professor Doutor, Universidade Federal do Paraná (UFPR), medeiros.ufpr@gmail.com

Resumo: A durabilidade das estruturas de concreto armado é essencial para a engenharia civil, especialmente em relação à prevenção e recuperação quanto à corrosão das armaduras. O reparo localizado é uma das técnicas mais utilizadas para reabilitação, no entanto, apresenta elevada taxa de falhas ao longo do tempo. Dados da *National Association of Corrosion Engineers* (NACE) apontam que cerca de 50% das estruturas de concreto armado passam por intervenções em até 10 anos após a sua construção. Um dos principais fatores associados à falha dos reparos é a incompatibilidade entre os materiais do reparo e do substrato de concreto. Nesse contexto, esta pesquisa tem como objetivo avaliar a durabilidade de reparos localizados realizados em corpos de prova prismáticos (15 x 15 x 60 cm) de concreto armado com argamassas contendo sílica de casca de arroz (SCA) como substituição parcial do cimento, nos teores de 0%, 5%, 10%, 15% e 20%. Os substratos foram dosados com e sem contaminação por cloretos. Este trabalho dá continuidade a um estudo anterior, com o objetivo de fornecer dados de monitoramento de longo prazo. A avaliação da corrosão das armaduras foi realizada por meio de medidas de resistividade elétrica e potencial de corrosão. Os resultados indicaram que a realização do reparo na estrutura gerou diferentes níveis de resistividade elétrica (na argamassa e no concreto), com um teor ótimo de 15% de adição de SCA no reparo, o que influenciou o avanço da corrosão pelo fenômeno da incompatibilidade eletroquímica.

Palavras-chave: Corrosão das armaduras, Durabilidade, Afinidade eletroquímica.

Abstract: The durability of reinforced concrete structures is essential in civil engineering, particularly regarding the prevention and repair of reinforcement corrosion. Localized repair is one of the most commonly used rehabilitation techniques; however, it shows a high failure rate over time. Data from the National Association of Corrosion Engineers (NACE) indicate that approximately 50% of reinforced concrete structures undergo interventions within 10 years of construction. One of the main factors associated with repair failure is the incompatibility between the repair materials and the concrete substrate. In this context, the objective of this research is to evaluate the durability of localized repairs performed on prismatic reinforced concrete specimens (15 x 15 x 60 cm) using mortars containing rice husk ash (RHA) as a partial replacement for cement, at replacement levels of 0%, 5%, 10%, 15%, and 20%. The substrates were prepared with and without chloride contamination. This study continues a previous investigation, aiming to provide long-term monitoring data. Reinforcement corrosion was assessed through electrical resistivity and corrosion potential measurements. The results indicated that the repair induced different levels of electrical resistivity (in the mortar and in the concrete), with an optimal content of 15% SCA addition in the repair, which influenced the progression of corrosion due to the phenomenon of electrochemical incompatibility.

Keywords: Reinforcement corrosion, Durability, Electrochemical compatibility.

1. Introdução

A durabilidade das estruturas de concreto resulta da interação do material com o ambiente, as condições de uso, operação e de manutenção. Uma mesma estrutura pode apresentar desempenhos distintos ao longo do tempo, dependendo desses fatores [14]. Também segundo Medeiros [14], diversos agentes contribuem para a degradação das estruturas, sendo os mais recorrentes a falta de manutenção, deficiências de projeto, falhas na execução e o desconhecimento dos mecanismos de deterioração envolvidos.

Entre os principais agentes de degradação, a corrosão das armaduras destaca-se como uma das principais causas da deterioração precoce e da consequente redução da vida útil das estruturas de concreto armado nas últimas décadas [11]. A análise de estruturas comprometidas com esse tipo de problema geralmente envolve o monitoramento de parâmetros como o Potencial de Corrosão (E_{corr}) e a Resistividade Elétrica (R).

A corrosão pode ser caracterizada como um processo de degradação resultante de interações químicas ou eletroquímicas com o meio, podendo ou não estar associada a ações mecânicas [9]. No caso das armaduras de aço inseridas no concreto, a corrosão ocorre tipicamente por mecanismos eletroquímicos, favorecidos pela presença de oxigênio e umidade sob condições normais de temperatura [12].

Diante desse cenário, intervenções corretivas são fundamentais para restabelecer as condições de uso e segurança das estruturas, evitando a perda funcional ou estrutural. Nesse contexto, os reparos localizados são uma prática recorrente, especialmente em regiões críticas. Para garantir o desempenho adequado desses reparos, é necessário verificar a compatibilidade entre o material de reparo e o concreto original, conforme os critérios estabelecidos [6].

A depender do mecanismo eletroquímico predominante, o reparo localizado deve cumprir ao menos um dos seguintes propósitos: interromper a reação anódica, bloquear a reação catódica ou impedir a condução eletrolítica que sustenta o processo corrosivo. É fundamental que, na área reparada, a atividade anódica seja cessada. Embora o método mais comum de reparo envolva a realcalinização (remoção do concreto deteriorado e sua substituição por um material novo), outras abordagens também são aplicáveis. Entre elas estão a repassivação das armaduras, o uso de inibidores de corrosão, a aplicação de barreiras físicas ou a adoção de sistemas de proteção catódica. Esses métodos podem incluir o uso de ânodos de sacrifício, revestimentos à base de zinco, sistemas de corrente impressa ou aplicação de películas protetoras sobre a superfície do concreto [12][20].

Tem-se investigado com frequência o uso de cinzas como aditivo em materiais cimentícios. Quando a queima das cascas de arroz ocorre sob condições controladas, o material resultante é conhecido como sílica de casca de arroz (SCA), caracterizado por elevada atividade pozolânica, comparável à de outras adições minerais

amplamente empregadas na indústria [13]. No contexto brasileiro, estudos demonstraram que a incorporação de SCA pode melhorar diversas propriedades do concreto, incluindo a diminuição da penetração de íons cloreto, a redução do coeficiente de carbonatação e o aumento da resistência inicial à compressão [8].

O presente trabalho tem como objetivo analisar os efeitos associados ao processo de deterioração prematura das armaduras, gerado pela presença de contaminação por cloretos em corpos de prova reparados. Dessa forma, será possível determinar os principais fatores que influenciam na ocorrência da corrosão eletroquímica.

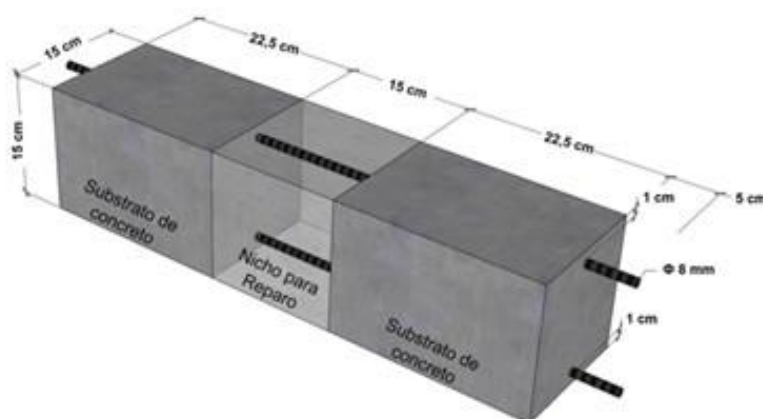
2. Metodologia

2.1 Corpos de Prova

Este estudo dá continuidade às investigações iniciadas por Daschevi [7] desenvolvidas através do Grupo de Pesquisa em Patologia e Recuperação das Construções da Universidade Federal do Paraná (PRC/UFPR). O objetivo do monitoramento é analisar o processo de deterioração prematura das armaduras entre o substrato e o sistema de reparo localizado, por meio de medições de Potencial de Corrosão (E_{corr}) e Resistividade Elétrica (R).

Foram acompanhados sete corpos de prova prismáticos de concreto armado de dimensões 15x15x60 cm (Fig. 1) com dois anos de idade. Dois desses prismas foram moldados integralmente em concreto armado, sendo um com concreto não contaminado (O-Sa) e o outro com concreto contaminado com 1,4% de cloretos (O-Cl). Os cinco prismas restantes possuíam substrato contaminado por cloretos e áreas de reparo localizado executadas com argamassa modificada. Vale ressaltar que o valor de 1,4% de contaminação por cloretos foi definido por Daschevi [7] para os corpos de prova. A variável entre esses reparos foi o teor de Sílica de Casca de Arroz (SCA) utilizado na composição da argamassa com proporções de 0%, 5%, 10%, 15% e 20%, conforme detalhado na Tabela 1.

Figura 1: Dimensões dos corpos de prova



Fonte: Daschevi (2022)

Tabela 1: Relação de corpos de prova utilizados

ESPÉCIME	REPARO	SCA	SUBSTRATO
R-CI-0	SIM	0 %	1,4 % Cl ⁻
R-CI-5	SIM	5 %	1,4 % Cl ⁻
R-CI-10	SIM	10 %	1,4 % Cl ⁻
R-CI-15	SIM	15 %	1,4 % Cl ⁻
R-CI-20	SIM	20 %	1,4 % Cl ⁻
O-Sa	NÃO	-	SÃO
O-CI	NÃO	-	1,4 % Cl ⁻

Fonte: Daschevi (2022)

2.2 Parâmetros de Avaliação

2.2.1 Potencial de Corrosão (E_{corr})

A interpretação dos resultados de potencial de corrosão (E_{corr}), medido entre as armaduras e o eletrodo de referência (Cu/CuSO₄), foi realizada com base nos valores estabelecidos pela norma ASTM C876 (2015), conforme apresentado na Tabela 2. É importante destacar que os critérios definidos por essa norma foram fundamentados em estudos experimentais voltados à corrosão do aço induzida pela presença de íons cloreto, e são apenas qualitativos. Para cada série avaliada, o valor representativo foi obtido a partir da média dos potenciais medidos nas duas armaduras inseridas em cada corpo de prova.

Tabela 2: Critérios de avaliação do potencial de corrosão no concreto

Valor encontrado	Probabilidade de corrosão
Mais negativo que -350 mV	Superior a 90%
De -200 a -350 mV	Incerta
Mais positivo que -200 mV	Inferior a 10%

Fonte: ASTM C876 (2015)

2.2.2 Resistividade Elétrica

Para a análise da resistividade elétrica do concreto, foram utilizados os intervalos de referência apresentados na Tabela 3, com base nas diretrizes do Comitê Euro-Internacional du Béton (CEB) [5]. É importante observar que, para aplicar os limites estabelecidos pelo CEB, foi necessário verificar a pertinência da aplicação de um fator de forma que possibilitasse a aproximação do corpo de prova a um meio semi-infinito, conforme recomenda a norma UNE 83988-2 (2012). A partir do ábaco desenvolvido por Gowers e Millard [9], que considera a razão b/d (largura do corpo de prova pela distância entre os eletrodos do resistímetro), identificou-se um fator de correção próximo de 1 para a geometria da amostra utilizada neste estudo.

Tabela 3: Critérios de avaliação da resistividade elétrica do concreto

Resistividade elétrica do concreto (kΩ.cm)	Risco de corrosão
> 20	Desprezível
10 - 20	Baixa
5 - 10	Alta
< 5	Muito alta

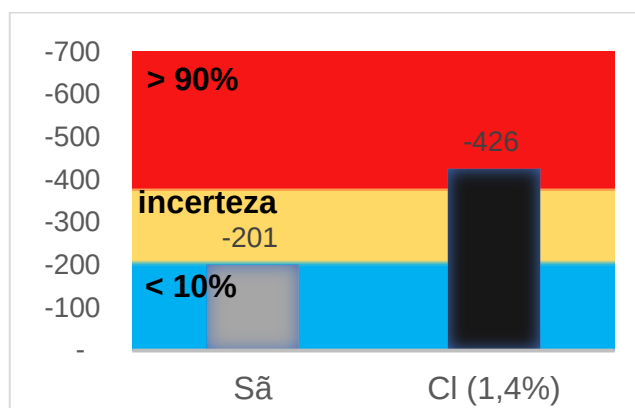
Fonte: ASTM C876 (2015)

3. Resultados e Discussão

3.1 Efeito da contaminação por cloretos

Foi realizada uma comparação entre os resultados obtidos para os corpos de prova sem reparo, sendo um isento de contaminação e outro com adição de 1,4% de íons cloreto (Cl^-). Conforme ilustrado na Figura 2, os valores de potencial de corrosão (E_{corr}) do prisma sem contaminação (S_a) situaram-se entre a faixa de probabilidade de corrosão inferior a 10% e a zona de incerteza definida pela norma ASTM C876 (2015). Em contrapartida, o prisma com concreto contaminado com 1,4% de Cl^- apresentou valores compatíveis com uma probabilidade de corrosão superior a 90%, resultado que pode ser atribuído à ação contínua dos íons cloreto presentes na matriz do concreto ao longo do tempo.

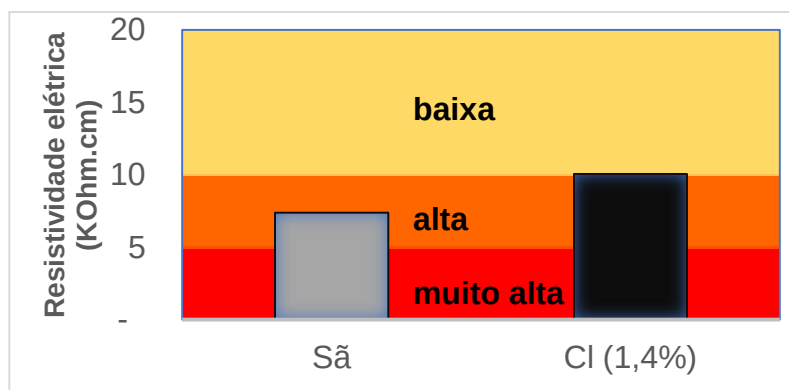
Figura 2: Potencial de corrosão dos prismas não reparados com e sem contaminação por cloretos



Fonte: Andrade (2023)

A partir da análise dos resultados de resistividade elétrica apresentados na Figura 3, observa-se que o prisma de concreto sem contaminação apresentou valores enquadrados na faixa de alto risco de corrosão, conforme os critérios estabelecidos pelo CEB (1991). Já o corpo de prova contaminado com íons cloreto exibiu resistividades significativamente superiores, aproximando-se da faixa correspondente a baixo risco de corrosão. De acordo com Real [17], concretos com teor de cloretos de até 2% em relação à massa de cimento tendem a apresentar elevação na resistividade elétrica, o que pode resultar em uma redução do risco de corrosão, conforme a classificação do CEB [5].

Figura 3: Resistividade elétrica dos prismas não reparados com e sem contaminação por cloretos

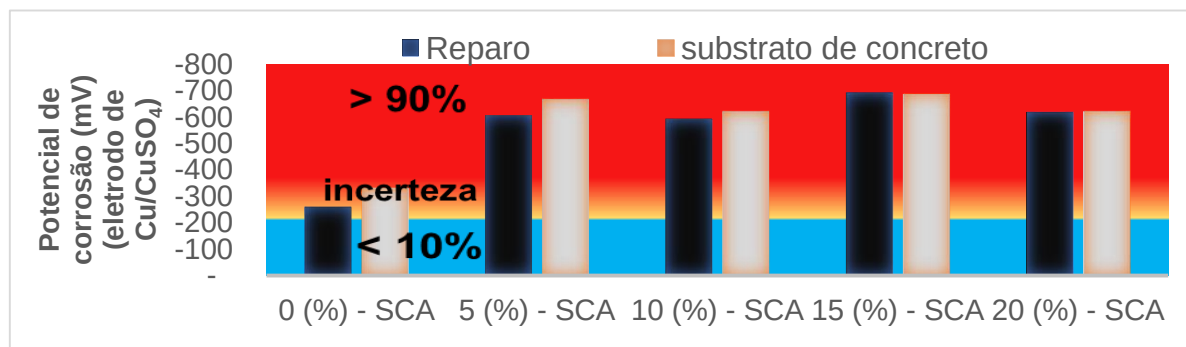


Fonte: Andrade (2023)

3.2 Efeito da Sílica de Casca de Arroz (SCA)

Conforme ilustrado na Figura 4, os valores de potencial de corrosão (E_{corr}) medidos na região de reparo mostraram-se próximos àqueles observados no substrato, não sendo identificada uma diferença de potencial evidente na interface entre os materiais. Além disso, observa-se uma redução expressiva nos valores de E_{corr} à medida que se incrementa o teor de sílica de casca de arroz na composição da argamassa de reparo.

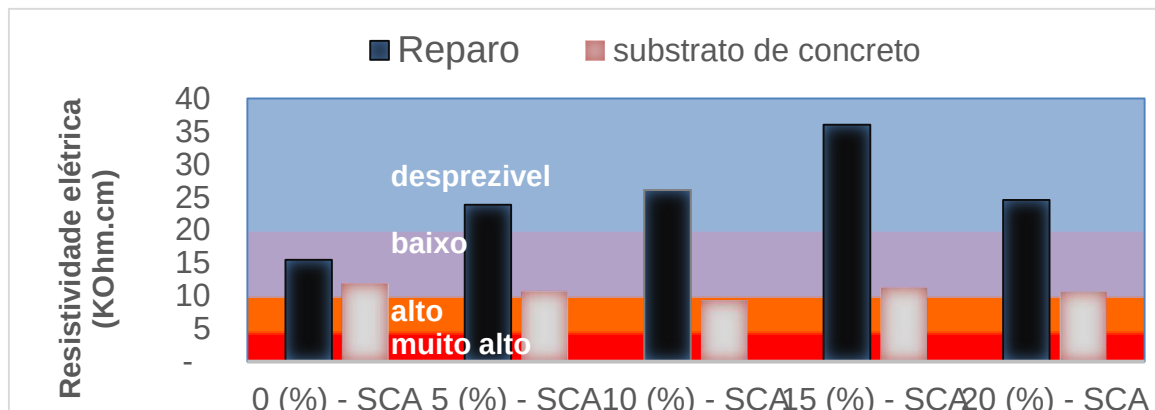
Figura 4: Potencial de corrosão dos prismas reparados



Fonte: Andrade (2023)

A Figura 5 evidencia um aumento expressivo nos valores de resistividade elétrica da região reparada em relação ao substrato, alcançando níveis compatíveis com a classificação de risco de corrosão desprezível segundo os critérios do CEB [5]. Observa-se, ainda, uma tendência de elevação da resistividade à medida que se aumenta o teor de sílica de casca de arroz (SCA) na argamassa, reforçando a influência positiva dessa adição na mitigação do risco de corrosão. Porém, deve-se observar que existe uma evidência de que o teor ótimo de SCA é de 15%, pois o teor de 20% reduziu a resistividade elétrica da área de reparo.

Figura 5: Efeito da sílica de casca de arroz na resistividade elétrica nos corpos de prova com argamassa de reparo.



Fonte: Andrade (2023)

3.3 Discussão dos resultados

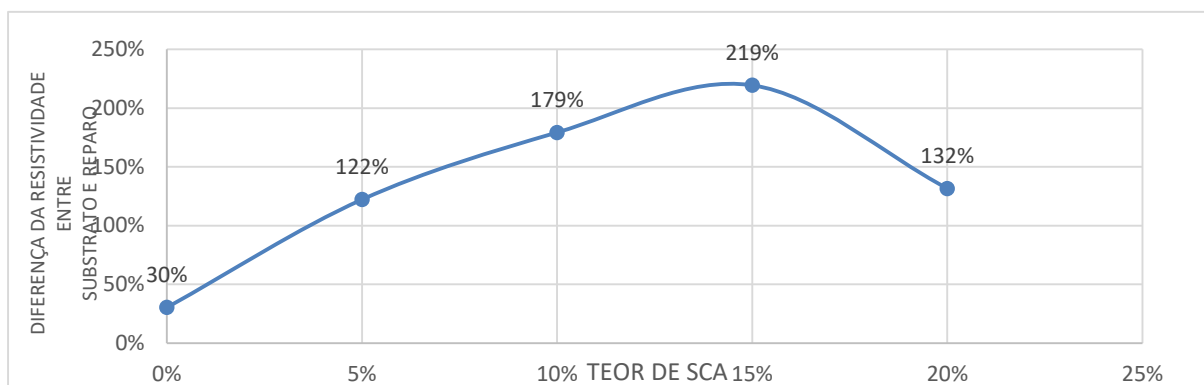
Mesmo quando há compatibilidade de deformações entre a argamassa de reparo e o concreto original, a técnica de reparo localizado ainda levanta questionamentos quanto à sua durabilidade [15]. No caso específico de estruturas afetadas por corrosão das armaduras devido à presença de cloretos, o processo de reparo envolve a remoção do concreto degradado e a recomposição da região danificada com argamassa nova. Com isso, a armadura passa a estar parcialmente envolvida por concreto contaminado e, parcialmente, por material novo e alcalino.

Essa configuração cria uma condição propícia ao surgimento de uma pilha eletroquímica (macro-célula de corrosão), uma vez que a armadura passa a estar submetida a dois ambientes distintos. Nessa situação, o trecho em contato com a argamassa de reparo tende a atuar como cátodo, enquanto a porção ainda imersa no concreto original, antes preservada, passa a funcionar como ânodo [3][12][15].

Nesse contexto, a Figura 6 apresenta a variação percentual da resistividade elétrica entre o concreto do substrato e a argamassa de reparo. Observa-se que, para a argamassa sem adição de sílica de casca de arroz, a diferença foi da ordem de 30%. Com a incorporação da pozolana, esse valor se elevou significativamente, atingindo aproximadamente 220%.

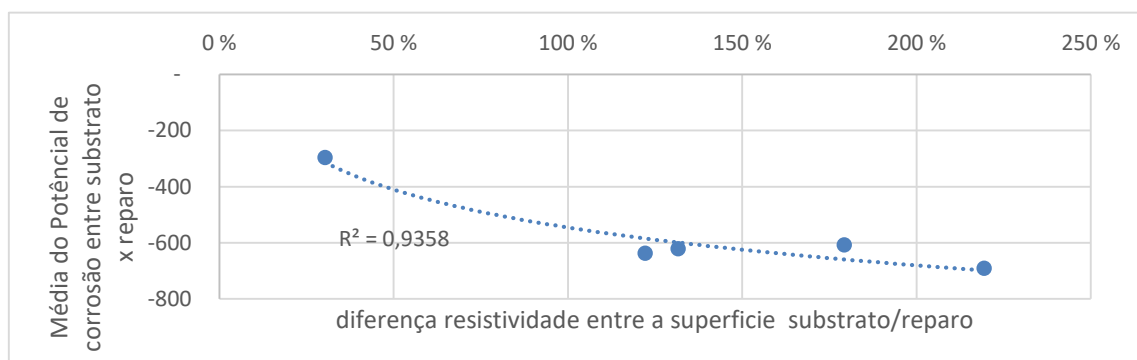
Essa discrepância na resistividade elétrica pode ter impactado o comportamento eletroquímico da peça como um todo, já que os valores de potencial de corrosão (E_{corr}) obtidos em toda a extensão do corpo de prova, tanto na região reparada quanto no concreto contaminado, indicam corrosão ativa (valores inferiores a -350 mV). Tais resultados sugerem uma possível incompatibilidade eletroquímica entre os materiais, hipótese reforçada com a Figura 7, que evidencia a correlação entre os valores de E_{corr} e a diferença percentual de resistividade elétrica entre a argamassa de reparo e o substrato contaminado por cloretos.

Figura 6: Diferença percentual entre a resistividade elétrica do substrato e a do reparo, para cada uma das séries de argamassa



Fonte: Andrade (2023)

Figura 7: Correlação entre a resistividade elétrica e o potencial de corrosão dos corpos de prova reparados



Fonte: Andrade (2023)

4. Conclusões

- As medições de potencial de corrosão (E_{corr}), realizadas para comparação entre concreto não contaminado e concreto com 1,4% de contaminação por íons cloreto, demonstraram ser eficazes na detecção de estados de corrosão ativa nas armaduras;
- A adição de sílica de casca de arroz (SCA) mostrou-se capaz de elevar significativamente a resistividade elétrica da argamassa de reparo, com variações registradas entre 30% e 220% ao longo dos ensaios;
- Foi identificada uma forte correlação logarítmica ($R^2 = 93,58\%$) entre os valores de E_{corr} e a diferença percentual de resistividade elétrica entre o substrato contaminado por cloretos e a argamassa de reparo;

- A aplicação do reparo localizado levou à formação de regiões com distintos níveis de resistividade elétrica ao longo da armadura, o que favoreceu o surgimento de macro-células de corrosão devido à incompatibilidade eletroquímica entre os materiais.

Diante disso, é possível dizer que a análise a longo prazo realizada neste trabalho, quando comparada ao estudo de Daschevi [7] previamente executado, trouxe resultados satisfatórios quanto à influência da sílica de casca de arroz no processo de corrosão das armaduras do concreto armado reparado com argamassa.

5. Agradecimentos

Agradecemos ao Centro de Estudos de Engenharia Civil (CESEC) pelo apoio fornecido ao longo do desenvolvimento desta pesquisa. Ao Laboratório de Materiais e Estruturas (LaME), pela disponibilização dos equipamentos e pelo suporte nas etapas experimentais. Expressamos também a nossa gratidão à Universidade Federal do Paraná (UFPR), instituição à qual estou vinculado, pelo incentivo à pesquisa científica e pela infraestrutura acadêmica oferecida. Registre-se um agradecimento especial para as agências brasileiras CNPq, CAPES e Fundação Araucária.

Referências

- [1] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C876 (2015). Standard test method for corrosion potentials of uncoated reinforcement steel in concrete.
- [2] 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.
- [3] ANDRADE, C.; ALONSO, C.; SARRÍA, J.; RÍO, O. Técnicas de reparação de estruturas danificadas por corrosão de armaduras. In: 4º Congresso Iberoamericano de Patologia das Construções, 4., Porto Alegre, 1997. Anais. Porto Alegre: UFRGS, 1997. v. 1, p. 47-54.
- [4] CASTRO, P. et al. Macrocell activity in slightly chloride-contaminated concrete induced by reinforcement primers. *Corrosion*, v. 59, n. 6, p. 535–546, 2003.
- [5] COMITÉ EUROPEU DE CONCRETO (CEB). Vibration problems in structure: bulletin d'information. N° 209, 1991.
- [6] CUSSON, D.; MAILVAGANAM, N. P. Durability of repair materials. *Concrete International*, v. 18, n. 3, p. 34–38, 1996.
- [7] DASCHEVI, P. A.; MEDEIROS, M. H. F. Efeito do ânodo incipiente em reparos localizados utilizando argamassas com sílica de casca de arroz (SCA) sobre substrato contaminado por íons cloretos. 2022. Tese (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

- [8] 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.
- [9] GENTIL, V. *Corrosão*. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.
- [10] GOWERS, K. R.; MILLARD, S. G. Measurement of concrete resistivity for assessment of corrosion severity of steel using Wenner technique. *ACI Materials Journal*, n. 96-M66, p. 536-541, Sept.-Oct., 1999.
- [11] HANSSON, C. M.; POURSAEE, A.; JAFFER, S. J. Corrosion of reinforcing bars in concrete. *The Masterbuilder*, v. 14, n. 12, p. 106–107, dez. 2012.
- [12] HELENE, P.; MONTEIRO, P. Reparos localizados podem ser considerados soluções eficientes para correção de problemas de corrosão de armaduras em estruturas de concreto armado? In: *Congresso Iberoamericano de Patologia das Construções*, Barquisimeto, 1993. *Anais*. Barquisimeto, 1993. v. 2, p. 80-89.
- [13] MALHOTRA, V. M.; MEHTA, P. K. Pozzolanic and cementitious materials. In: *Advances in Concrete Technology*, v. 1. Gordon and Breach Publishers, 1996.
- [14] MEDEIROS, M. H. F.; ANDRADE, J. J. O.; HELENE, P. Durabilidade e vida útil das estruturas de concreto. *Concreto: Ciência e Tecnologia – IBRACON*, 2011.
- [15] MEDEIROS, M. H. F. Estruturas de concreto com corrosão de armaduras por carbonatação: comparação de argamassas de reparo quanto à proteção do aço. 2002. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo.
- [16] MONTEIRO, P. J. M.; MEHTA, P. K. *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*. São Paulo: IBRACON, 2008.
- [17] PARANDE, A. K.; RAMSAMY, P. L.; ETHIRAJAN, S.; RAO, C. R. K.; PALANISAMY, N. Deterioration of reinforced concrete in sewer environments. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, v. 159, p. 11-20, 2006.
- [18] REAL, L. V. Influência do teor de cloretos na resistividade elétrica do concreto como parâmetro de durabilidade. *CONCRETO & Construções – IBRACON*, 2015.
- [19] SILVA, T. J. Predicción de la vida útil de forjados unidireccionales de hormigón mediante modelos matemáticos de deterioro. 1998. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universitat Politècnica de Catalunya, Catalunya, Espanha.
- [20] ZHANG, J.; MAILVAGANAM, N. P. Corrosion of concrete reinforcement and electrochemical factors in concrete patch repair. *Canadian Journal of Civil Engineering*, v. 26, p. 255–263, 2006.