

COMPORTAMENTO ELETROQUÍMICO DO VERGALHÃO DE AÇO 50S REVESTIDO COM ARGAMASSA EM MEIO CORROSIVO DE ÁCIDO SULFÚRICO

Autores: Davi Jimenez Mascarenhas¹, José Augusto Mello dos Santos², Simoni de Almeida Pinotti³, Andréa Santos Liu⁴, Liu Yao Cho⁵

^{1,2,3,5}Universidade do Vale do Paraíba – FEAU e IP&D, Avenida Shishima Hifumi, 2911, Urbanova - 12244-000 - São José dos Campos-SP, Brasil, ⁴Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, Rodovia Presidente Dutra, km 145 s/n, Jardim Diamante, São José dos Campos-SP, 12223-201. ¹davijimenezmascarenhas@hotmail.com, ²jose.santos@univap.br, ³sp.engequim@gmail.com, ⁴aliu@ifsp.edu.br, ⁵liu@univap.br

Resumo

O vergalhão de aço 50S é amplamente utilizado na construção civil, devido ao seu baixo custo e a facilidade de soldabilidade. Para aumentar a sua durabilidade, são empregados aditivos, que retardam a taxa de corrosão do material ao longo do tempo. Em ambientes agressivos, como em Estações de Tratamento de Esgoto, ácidos produzidos por bactérias, podem causar degradação nas estruturas de concreto, promovendo a corrosão do vergalhão. Este trabalho visa analisar o comportamento eletroquímico do vergalhão de aço 50S recoberto com diferentes espessuras de argamassa em meio corrosivo de ácido sulfúrico. Também foi investigado o desempenho como inibidor de corrosão de um aditivo comercial, que tem sido utilizado para promover a impermeabilização de estruturas de concreto. Os resultados obtidos por meio de ensaios de potencial de circuito aberto e de polarização potenciodinâmica indicaram que a eficiência de proteção depende da espessura da argamassa e da presença do aditivo. A proteção do aço ocorreu por mecanismos de barreira física, inibição catódica e pela formação de uma película passiva na superfície metálica.

Palavras-chave: aço 50S, argamassa, aditivo, corrosão, ácido sulfúrico.

Área do Conhecimento: Engenharias, Engenharia Química.

Introdução

Em grandes continentes do mundo como Europa e América, seus países apresentam uma necessidade de reparos nas Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) por conta do alto ataque ácido nas tubulações que acontecem há vários anos, gerando custos de até US\$ 21 bilhões por ano para reparar os danos, sendo necessário em diversas ocasiões, estudos para o aumento da sustentabilidade das tubulações e a gestão adequada do saneamento ambiental. (Godinho; Medeiros *et al.*, 2019)

Nessas ETEs, o concreto armado utilizado na construção das estações é submetido a diversos fatores corrosivos, sejam eles por meio da concentração de ácido sulfúrico (H₂SO₄), da alteração do pH da pasta de cimento que protege o vergalhão ou por meio de ação de bactérias como *Thiobacillus thioparus*. O desempenho do concreto utilizado na proteção do aço depende da dosagem do concreto e das características de sua matriz hidratada, pois as propriedades da pasta de cimento hidratada, juntamente com o tipo de cimento *Portland* especificado e com a opção pelo uso de adições minerais, interferem diretamente na microestrutura da pasta, podendo propiciar a execução de concretos com a mesma resistência à compressão, porém com distintas durabilidades frente à ação de determinado agente deletério (Hoppe Filho *et al.*, 2014). Esta contínua exposição do concreto aos fatores corrosivos faz com que o aço induza maiores trincas e falhas.

O estudo e a compreensão da corrosão de aço em concreto é um tema de relevância devido a necessidade de aumentar a durabilidade das estruturas de concreto armado. As técnicas para estudo da corrosão em vergalhões de aço em concreto variam entre eletroquímicas, químicas, físicas e microestruturas, com diferentes graus de invasividade, precisão e custo. A escolha depende dos

objetivos (inspeção rápida, estudo do mecanismo, monitoramento contínuo) e das condições da estrutura (idade, exposição ambiental, acessibilidade).

Este trabalho tem o objetivo de analisar o comportamento do aço 50S revestido com argamassa, estudando a correlação entre a corrosão do material em meio corrosivo de ácido sulfúrico com implementação de aditivo comercial para a verificação da melhoria da camada protetora de argamassa que reveste o aço.

No trabalho, foram feitos estudos com o aditivo comercial Penetron® na argamassa, sem o aditivo e utilizando somente o eletrodo de aço para analisar o comportamento da ação corrosiva do meio, e desta forma levantar parâmetros eletroquímicos para verificar o quanto o vergalhão resistiu ao ataque de espécies corrosivas e como o aditivo altera o comportamento na proteção do aço.

Metodologia

Os ensaios eletroquímicos de potencial de circuito aberto (OCP) e de polarização potenciodinâmica foram realizados com o uso do potenciostato/galvanostato Autolab PGSTAT302N, utilizando-se uma célula eletroquímica contendo três eletrodos: eletrodos de trabalho, de referência e o auxiliar. O eletrodo de referência foi um de Ag/AgCl e o eletrodo auxiliar com um bastão de platina, ambos da marca Metrohm®. O eletrodo de trabalho foi o aço 50S, amplamente utilizado na construção civil, com área exposta de 0,53 cm² e recoberta por uma pré camada de argamassa de 1,0 ou 2,0 cm de espessura. Antes de cada análise o eletrodo de trabalho foi desbastado com lixas d'água com granulometrias variando-se de 320, 400, 600, 800, 1200 mesh e por fim, polido em feltro com alumina. Na sequência, foi colocada uma pré camada de argamassa e mergulhada na solução eletrolítica de estudo.

As argamassas foram preparadas utilizando 50g de argamassa Votorantim, 10 gramas de água e, quando necessária a utilização do aditivo, 6,7g de Penetron®.

Os ensaios de potencial de circuito aberto (OCP) foram realizados durante cerca de 1 hora, utilizando-se como meio corrosivo a solução aquosa contendo 0,10 mol.L⁻¹ de ácido sulfúrico.

Os ensaios de polarização potenciodinâmica foram realizados em solução aquosa contendo 0,10 mol.L⁻¹ de ácido sulfúrico, variando-se o potencial de -1,5 a +1,0 V, com velocidade de varredura de 1,0 mV s⁻¹.

A partir destes ensaios, foram tratadas as curvas de Tafel, das quais foram levantados os parâmetros eletroquímicos: potenciais de corrosão (E_{corr}), densidades de corrente de corrosão (j_{corr}) e eficiências da proteção contra corrosão. As eficiências de proteção foram calculadas a partir dos dados das densidades de corrente de corrosão (j_{corr}) obtidos nos experimentos, conforme a seguinte equação (Yeh et al., 2008):

$$Eficiência\ de\ Proteção\ (\%) = \left[\frac{j_{ref} - j_{corr}}{j_{ref}} \right] \times 100$$

Sendo, j_{corr} , a densidade de corrente de corrosão do aço revestido e j_{ref} , a densidade de corrente de corrosão do aço de referência.

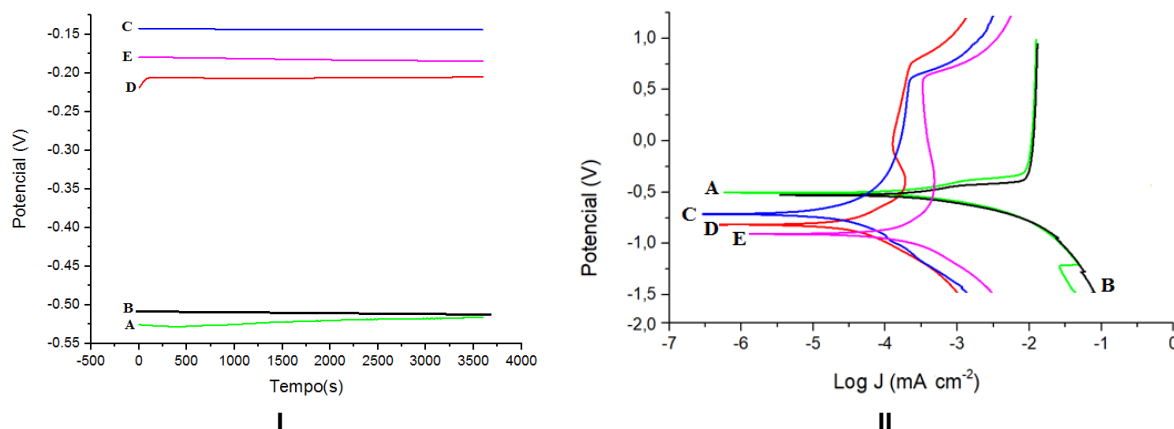
Resultados

A Figura 1 (I) apresenta as curvas de potencial de circuito aberto (OCP) em função do tempo para determinar a tendência da superfície de aço (vergalhão) sofrer corrosão em meio agressivo de H₂SO₄ 0,10 mol.L⁻¹.

Os ensaios de polarização potenciodinâmica foram realizados para determinar, de forma rápida, a taxa de corrosão do metal (aço 50S). Esse ensaio consistiu em submeter a interface eletrodo/solução a valores crescentes de sobrepotencial para obtenção de curvas de potencial versus densidade de corrente, em condições de equilíbrio estacionário. A partir destas curvas de polarização, foram traçadas as curvas de Tafel para obter os parâmetros eletroquímicos, associados à corrosão do metal (Oliveira, 2011). A Figura 1 (II) também apresenta o comportamento das curvas de Tafel do eletrodo de aço revestido com argamassa em meio corrosivo de ácido sulfúrico.

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

Figura 1. (I)-Curvas de OCP e (II)-Curvas de Tafel para o aço: (A) apenas polido; (B) recoberto com 1,0 cm de argamassa; (C) recoberto com 2,0 cm de argamassa contendo aditivo; (D) recoberto com 2,0 cm de argamassa; (E) recoberto com 1,0 cm de argamassa contendo aditivo



Fonte: elaborado pelos autores

A tabela 1 mostra os parâmetros eletroquímicos das amostras extraídas das curvas de Tafel, o potencial de corrosão (E_{corr}), densidade de corrente de corrosão (J) e a eficiência de proteção para cada superfície.

Tabela 1 - Parâmetros eletroquímicos obtidos das curvas de Tafel

Vergalhão de aço 50S	E_{corr} (mV)	Log (J)	J (mA.cm ⁻²)	Eficiência de proteção (%)
Apenas polido, referência (A)	- 580	-3,777	$1,671 \cdot 10^{-1}$	-
Recoberto com 1,0 cm de argamassa (B)	- 526	-3,815	$1,531 \cdot 10^{-1}$	8,38
Recoberto com 2,0 cm de argamassa (D)	- 821	-4,780	$1,660 \cdot 10^{-2}$	90,07
Recoberto com 1,0 cm de argamassa + aditivo (E)	- 910	-4,344	$4,529 \cdot 10^{-2}$	72,90
Recoberto com 2,0 cm de argamassa + aditivo (C)	- 710	-5,033	$9,269 \cdot 10^{-3}$	94,45

Discussão

Os resultados dos ensaios de potencial de circuito aberto (OCP) indicaram que a amostra de aço exposta ao meio agressivo de ácido sulfúrico apresentou os valores de potenciais mais negativos (em torno de -0,520 V), sugerindo-se maior susceptibilidade à corrosão. Também foi observado que o aço recoberto com a camada de argamassa de 1,0 cm apresentou valores de OCP próximos à superfície metálica sem nenhum recobrimento, indicando propensão a corrosão. Por outro lado, o recobrimento com 2,0 cm de camada de argamassa deslocou os valores de OCP para a direção mais positiva (aproximadamente -0,21V), indicando menor tendência à corrosão, já que com essa espessura, a difusão de espécies corrosivas até a superfície do vergalhão é dificultada, reduzindo o processo corrosivo.

Com adição do aditivo à argamassa, os valores de OCP foram deslocados para a direção mais positiva, independentemente da espessura do recobrimento com a argamassa, inferindo-se que o aditivo pode corroborar a inibição da corrosão do substrato metálico. Ademais, pode-se afirmar que a condição de menor tendência à corrosão é o vergalhão recoberto com 2,0 cm de argamassa, contendo o aditivo.

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

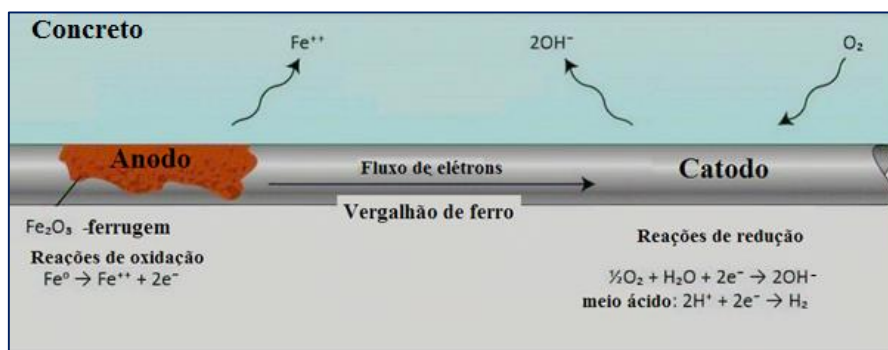
A análise das curvas de Tafel revelou que quando o eletrodo sem recobrimento foi exposto à solução ácida, a densidade de corrente de corrosão (j) assumiu o valor de $1,671 \cdot 10^{-1} \text{ mA.cm}^{-2}$. Já o eletrodo recoberto com 1,0 cm de argamassa apresentou uma densidade de corrente de corrosão ligeiramente menor de $1,531 \cdot 10^{-1} \text{ mA.cm}^{-2}$, em relação ao eletrodo sem o recobrimento com a argamassa. Esta camada fina de argamassa oferece pouca resistência à difusão de íons, permitindo maior interação corrosiva entre a solução ácida e o metal, oferecendo apenas uma eficiência de proteção de 8,38%. Por outro lado, o aumento da espessura da argamassa para 2,0 cm, corroborou a redução significativa da densidade de corrente de corrosão, com o valor de $1,660 \cdot 10^{-2} \text{ mA.cm}^{-2}$, conferindo uma eficiência de proteção de 90,07%. Além disso, nesse caso, observou-se na curva de Tafel, que esse eletrodo apresentou uma região de passivação, característica da proteção do aço conferida pela elevada alcalinidade do concreto (Silva, 2020).

Os resultados de Tafel também indicaram que a adição do aditivo contribuiu para a redução da taxa de corrosão do metal, já que as densidades de corrente de corrosão foram reduzidas para $4,529 \cdot 10^{-2} \text{ mA.cm}^{-2}$ com o recobrimento do vergalhão com 1,0 cm de argamassa + aditivo, conferindo uma proteção de 72,90%, e $9,269 \cdot 10^{-3} \text{ mA.cm}^{-2}$, com o recobrimento do vergalhão com 2,0 cm de argamassa + aditivo, consistindo em uma eficiência de proteção contra corrosão de 94,45%.

Com relação ao potencial de corrosão (E_{corr}), observou-se que a presença do aditivo na argamassa conferiu um comportamento típico de inibidor catódico, promovendo o potencial de corrosão para valores mais negativos -910 mV (na presença de 1,0 cm de argamassa) e -710 mV (em 2,0 cm de argamassa), com menores valores de correntes catódicas, associadas às reações de redução de oxigênio (O_2) ou íons de H^+ . De acordo com Bijapur et al. (2023), os inibidores catódicos atuam de várias maneiras: mudando o potencial de redução, provocando a passivação do cátodo e diminuindo a disponibilidade de íons para reações de redução. Nas curvas de Tafel, o comportamento passivo do vergalhão de aço também foi evidenciado.

A Figura 2 apresenta as reações envolvidas na corrosão eletroquímica do vergalhão de aço.

Figura 2. Reações envolvidas no processo corrosivo do vergalhão de ferro.



Fonte: Adaptado de <https://pt.chemtreat.com/cooling-systems-corrosion-inhibition/>

Em ambientes ácidos, como o ácido sulfúrico, a passivação pode ser mais difícil de ocorrer. Contudo, a argamassa e seus componentes podem promover a formação de uma camada passiva estável, como óxidos ou hidróxidos metálicos, que protegem a superfície contra a corrosão. A adição do inibidor (aditivo) pode funcionar formando um filme protetor de óxidos ou alterando a reatividade da superfície, tornando a passivação mais favorável. Isso é refletido no deslocamento das curvas de Tafel e na diminuição da corrente de corrosão.

A observação da região passiva nas curvas de Tafel evidencia que o aditivo pode atuar como um inibidor catódico, promovendo uma melhor estabilização da camada passivada, que também reduz a ocorrência de corrosão por pite no metal.

Conclusão

A argamassa pode atuar como uma barreira física entre o metal e a solução eletrolítica (H_2SO_4). Quanto maior a espessura da argamassa, maior a resistência à difusão de íons da solução e, portanto, a taxa de corrosão do aço tende a diminuir. Os resultados indicaram que a camada de argamassa de 1,0 cm permitiu maior interação entre a superfície metálica e a solução corrosiva ácida, o que pode resultar em uma taxa de corrosão relativamente mais alta em comparação com a argamassa de maior espessura. Na camada de 2,0 cm de argamassa, a difusão de íons se torna mais restrita, o que pode reduzir a taxa de corrosão, que mesmo em ambiente ácido promoveu a passivação do aço 50S.

Além disso, a presença do inibidor na argamassa promoveu o deslocamento do potencial de corrosão para valores mais negativos, devido a menores correntes catódicas e possibilitou maior desempenho da proteção contra corrosão, refletido nos maiores valores de eficiências de proteção contra corrosão.

Referências

BIJAPUR, K.; MOLAHALLI, V.; SHETTY, A.; TOGHAN A.; PADOVA P.D.; HEGDE, G Recent Trends and Progress in Corrosion Inhibitors and Electrochemical Evaluation. **Appl. Sci.**, 13(18), 10107, 2023; DOI: doi.org/10.3390/app131810107. Disponível em: www.mdpi.com/2076-3417/13/18/10107

GODINHO, J. P.; MEDEIROS, M. H. F.. Biodeterioração do concreto armado exposto à agressividade ambiental do reator UASB de uma estação de tratamento de esgoto sanitário. **Revista técnico-científica do CREA-PR**, edição especial 4º SPPC, p 1-15, 2019 Acesso em: 18 ago. 2025.

HOPPER FILHO, J.; RHEINHEIMER, B.; KHOE, S. S.; ARTIGAS, L. V.; SABBAG, A. F.; MEDEIROS, M. H. F.. Degradação do concreto de uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) por ácido sulfúrico biogênico. **Revista ALCONPAT**, v. 4, n. 2, p. 84-96, 2014.

OLIVEIRA, P.C.; BERTAZZOLI, R.. Determinação da densidade de corrente de corrosão em meios de baixa condutividade: uso de microeletrodos para minimizar a queda ôhmica. **Química Nova**, v. 34, n. 2, p. 325-329, 2011.

SILVA, D. R. F.; TELES, E. C.; BARROS, E. N. S. Patologias em estruturas de concreto armado em ambiente industrial. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**. v. 06, n. 10, p. 14-41, 2020. Disponível em: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-civil/patologias-em-estruturas> Acesso em: 22 ago.2025.

YEH, J. M.; YAO, C. T.; HSIEH, C. F.; LIN, L. H.; CHEN, P. L.; WU, J. C.; YANG, H. C.; WU, C. P. Preparation, characterization and electrochemical corrosion studies on environmentally friendly waterborne polyurethane/ Na^+ -MMT clay nanocomposite coatings. **European Polymer Journal**, 44, p. 3046-3056, 2008.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com equipamentos de projetos apoiados pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP 99/12586-0).