

INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE TRATAMENTO TÉRMICO NA RESISTÊNCIA À CORROSÃO DE VERGALHÕES CA-50

INFLUENCE OF HEAT TREATMENT PARAMETERS ON THE CORROSION RESISTANCE OF CA-50 REBARS

Thiago Henrique Lima Pereira de Barros¹
Aureliano Xavier dos Santos²

RESUMO

Os vergalhões de aço carbono CA-50 são componentes essenciais na construção civil, assegurando resistência e durabilidade das estruturas de concreto armado. A corrosão desses vergalhões em estruturas de concreto armado é uma das patologias mais críticas, pois compromete a integridade estrutural, reduz a vida útil das edificações e gera elevados custos de manutenção. Este estudo tem como objetivo avaliar os efeitos dos parâmetros do tratamento térmico na resistência à corrosão e na microestrutura dos vergalhões CA-50. A influência dos parâmetros (taxa de aquecimento, temperatura de patamar e tempo de permanência) foi analisada por meio do planejamento experimental fatorial em três níveis. A resistência à corrosão foi avaliada por meio das técnicas de polarização potenciodinâmica linear e espectroscopia de impedância eletroquímica. Os resultados obtidos indicaram que o tempo de permanência e a taxa de aquecimento afetam significativamente o potencial de corrosão, enquanto a corrente de corrosão não apresentou variações relevantes em relação aos parâmetros estudados. Observou-se que o tempo de permanência influenciou de forma significativa a resistência à polarização, enquanto a temperatura de patamar não exerceu influência direta sobre nenhuma das variáveis de resposta. Além disso, foram observados tanto aumento quanto redução na resistência à corrosão em função das microestruturas formadas após o tratamento térmico. Dessa forma, a otimização dos parâmetros de tratamento térmico pode aprimorar a resistência à corrosão dos vergalhões CA-50, devido à relação direta com o tamanho de grão e as características microestruturais resultantes.

Palavras-chave: tratamento térmico em vergalhões; corrosão em vergalhões; resistência à corrosão; planejamento experimental fatorial.

ABSTRACT

The CA-50 carbon steel rebar is an essential component in civil construction, ensuring the resistance and durability of reinforced concrete structures. The corrosion of rebar in reinforced concrete is one of the most critical pathologies, as it compromises structural integrity, reduces the lifespan of buildings, and generates significant maintenance costs. This study aims to evaluate the effects of heat treatment parameters on the corrosion resistance and microstructure of CA-50 rebar. The influence of parameters, including heating rate, holding temperature, and

¹ Bacharelado em Engenharia de Materiais - Universidade Federal Rural de Pernambuco – Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho, 2024.

² Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais – Universidade Federal Rural de Pernambuco – Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho

holding time, was analyzed using a three-level factorial experimental design. Corrosion resistance was assessed through linear potentiodynamic polarization and electrochemical impedance spectroscopy techniques. The results indicated that both holding time and heating rate significantly affect the corrosion potential, while the corrosion current showed no relevant variations concerning the studied parameters. It was observed that holding time had a significant impact on polarization resistance, whereas holding temperature did not exert a direct influence on any of the response variables. Additionally, both increases and decreases in corrosion resistance were observed based on the microstructures formed after heat treatment. Thus, optimizing the heat treatment parameters can enhance the corrosion resistance of CA-50 rebar, due to the direct relationship with grain size and resulting microstructural characteristics.

Keywords: heat treatment in rebars; rebar corrosion; corrosion resistance; factorial experimental design.

INTRODUÇÃO

Os vergalhões de aço carbono CA-50 desempenham um papel fundamental na resistência, segurança e durabilidade das estruturas de concreto armado. A corrosão desses componentes estruturais tem se destacado como uma das principais manifestações patológicas em estruturas de concreto armado, reduzindo a sua vida útil e podendo causar prejuízos consideráveis¹.

A obtenção dos vergalhões de aço CA-50 ocorre por meio do processo de laminação a quente. Esse processo pode ser iniciado com o aquecimento de um lingote de aço, proveniente do processo lingotamento contínuo, em temperaturas superiores a temperatura de recristalização. Em seguida, o lingote é submetido a tensões externas de compressão e cisalhamento por meio de cilindros rotativos, que reduzem e modificam a seção transversal do elemento até que as características desejadas sejam alcançadas. Finalizado o processo de conformação plástica da peça, ela é submetida a um processo de tratamento

térmico e resfriamento ao ar livre². A etapa de tratamento térmico é crítica, pois altera as propriedades físicas e mecânica do material e, conseqüentemente, afeta a resistência à corrosão³.

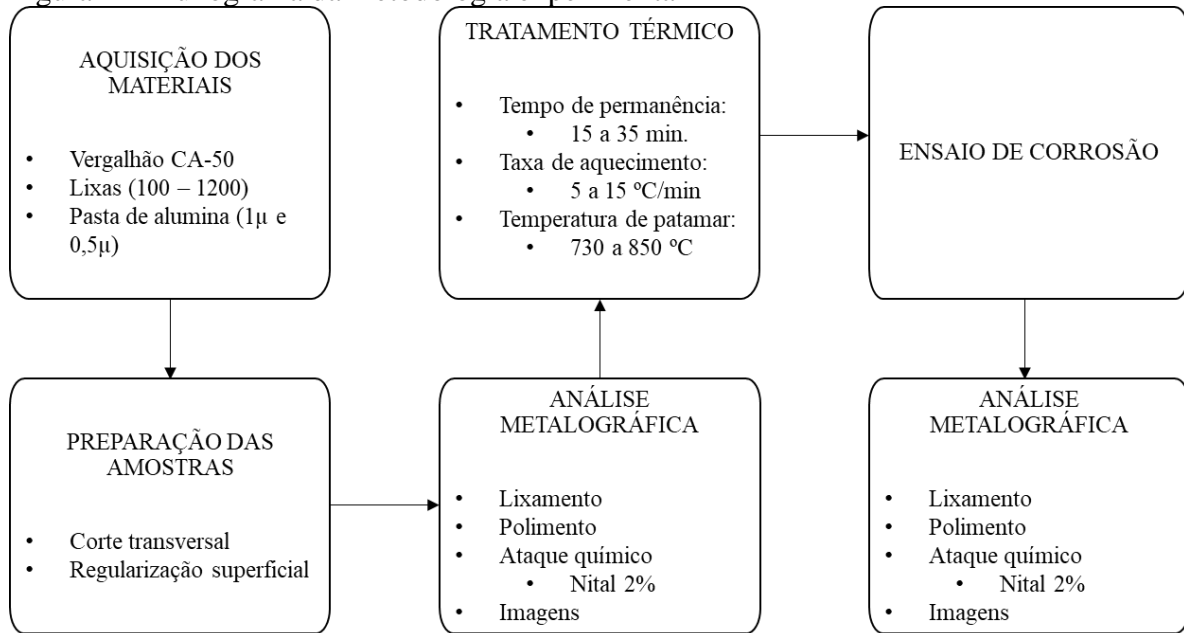
Dada a importância do desempenho dos vergalhões em relação à corrosão, é fundamental expandir o conhecimento a respeito dos efeitos das variáveis do tratamento térmico na resistência à corrosão do vergalhão CA-50. As principais variáveis que podem influenciar na resistência mecânica e a corrosão são, taxa de aquecimento, temperatura de patamar, tempo de permanência, além de atmosfera do forno e meio de arrefecimento.

Desta forma, este estudo tem como objetivo avaliar sua resistência à corrosão antes e depois do tratamento térmico.

METODOLOGIA

O fluxograma apresentado na Figura 1 descreve a seqüência metodológica aplicada neste estudo.

Figura 1 – Fluxograma da metodologia experimental



Fonte: O autor, 2024.

Material e preparação das amostras

O material utilizado neste estudo foi fornecido por uma siderúrgica localizada na região metropolitana do Recife. O vergalhão de aço CA-50 utilizado, possui entre 0,20-0,25% de carbono em sua composição, diâmetro de 15 mm e foi tratado termicamente por um sistema Thermex após o processo de laminação a quente.

O vergalhão foi cortado em corpos de prova com 10 mm de espessura utilizando uma serra-fita com resfriamento à base de água. Após o corte, as amostras foram lixadas para remoção de imperfeições superficiais e nivelamento da superfície de interesse.

Análise metalográfica

Para análise morfológica do material, os corpos de prova foram lixados em uma politriz utilizando lixas d'água de 100, 220, 400, 600, 1000 e 1200. Após a etapa de lixamento, os corpos de prova foram polidos com pastas de alumina de 1µm e 0,5µm para obtenção de uma superfície livre de arranhões.

Para revelar a microestrutura do material, foi realizado um ataque químico utilizando uma solução de Nital 2% à

temperatura ambiente, por 6 a 10 segundos. Finalizado o ataque, as amostras foram lavadas em água e álcool e, posteriormente, secas. As imagens metalográficas foram obtidas antes e depois do tratamento térmico utilizando um microscópio óptico Olympus.

Tratamento térmico

O tratamento térmico foi realizado em forno mufla digital da EDG modelo 3000 10P, com taxa de aquecimento (Tx) variando entre 5°C/min e 15°C/min, temperatura de patamar (T) entre 730°C e 850°C, e tempo de permanência (t) entre 15 min e 35 min. A etapa de resfriamento foi realizada ao ar livre, em um ambiente climatizado a 22°C.

Planejamento experimental fatorial

Este estudo utilizou um planejamento fatorial 2³, com a adição de três experimentos no ponto central, totalizando 11 experimentos. As variáveis foram avaliadas nos níveis codificados: baixo (-1), central (0) e alto (+1). Os experimentos foram realizados em ordem aleatória para evitar erros sistemáticos, e os resultados foram analisados utilizando o software Minitab, versão 19, para

determinar o nível de significância (α), indicado pelo Valor-P, das variáveis de entrada nas respostas obtidas. Uma variável de entrada que possui efeito estatisticamente significativo sobre uma variável de resposta possui nível de significância (α) menor ou igual a 0,05, o que implica uma probabilidade de 95% de que a variável de entrada tenha influência sobre a variável de resposta analisada⁴.

As Tabelas 1 e 2 apresentam os parâmetros operacionais e a matriz de planejamento experimental utilizados neste estudo.

Tabela 1: Valores reais e níveis dos fatores de planejamento fatorial completo 2³

| Variáveis | Níveis | | |
|-----------------------------------|--------|-----|-----|
| | -1 | 0 | +1 |
| Tempo de permanência (t) (min) | 15 | 25 | 35 |
| Taxa de aquecimento (Tx) (°C/min) | 5 | 10 | 15 |
| Temperatura de patamar (T) (°C) | 730 | 790 | 850 |

Fonte: O autor, 2024.

Tabela 2: Matriz de planejamento experimental

| Experimentos | Variáveis de entrada | | |
|--------------|----------------------|-------------|--------|
| | t (min) | Tx (°C/min) | T (°C) |
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 15 | 5 | 730 |
| 2 | 15 | 5 | 850 |
| 3 | 15 | 15 | 730 |
| 4 | 15 | 15 | 850 |
| 5 | 35 | 5 | 730 |
| 6 | 35 | 5 | 850 |
| 7 | 35 | 15 | 730 |
| 8 | 35 | 15 | 850 |
| 9 | 25 | 10 | 790 |
| 10 | 25 | 10 | 790 |
| 11 | 25 | 10 | 790 |

Fonte: O autor, 2024.

O corpo de prova correspondente ao experimento 0 (zero) foi utilizado como referência e não passou por nenhum tratamento térmico adicional. Este corpo de prova não foi incluído no planejamento experimental fatorial.

Análise de Corrosão

Para avaliar a resistência a corrosão, foram utilizadas duas técnicas eletroquímicas: espectroscopia de impedância eletroquímica (EIE) e polarização potenciodinâmica linear (PPL). Os ensaios foram realizados em um potenciostato VersaStation 3, utilizando uma célula convencional de três eletrodos. Os corpos de prova foram utilizados como o eletrodo de trabalho (WE), o eletrodo de calomelano saturado (Hg/Hg₂Cl₂, KCl sat.) como eletrodo de referência (RE), e fio de platina como contra eletrodo (CE). Cada experimento utilizou 60 ml de uma solução eletrolítica de NaCl a 3,5%.

O potencial de circuito aberto (OCP) foi monitorado por 3600 segundos, para garantir a estabilização do potencial. Após a estabilização do OCP, foi iniciado o ensaio de polarização, no qual se realizou a varredura de potencial na faixa de -1 V a 1 V, a uma taxa de varredura de 1 mV/s.

Para realizar as medições da EIE, foi utilizada a faixa de frequência de 10 kHz a 10 mHz, aplicando-se uma perturbação de 10 mV (rms).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados para o potencial de corrosão (E_{corr}), corrente de corrosão (i_{corr}) e resistência à polarização (R_p), obtidos após os tratamentos térmicos, estão apresentados na Tabela 3, com exceção do experimento 0, que corresponde à amostra de referência sem tratamento térmico adicional.

Tabela 3: Matriz de planejamento experimental com variáveis de resposta

| Experimentos | Variáveis de entrada | | | Variáveis de resposta | | |
|--------------|----------------------|-------------|--------|-----------------------|-----------|---------|
| | t (min) | Tx (°C/min) | T (°C) | Ecorr (V) | icorr (A) | Rp(Ω) |
| 0 | 0 | 0 | 0 | -552,30m | 173,60n | 30,49M |
| 1 | 15 | 5 | 730 | -520,63m | 12,708n | 58,39M |
| 2 | 15 | 5 | 850 | -542,50m | 27,17n | 117,40M |
| 3 | 15 | 15 | 730 | -576,10m | 16,14n | 131,50M |
| 4 | 15 | 15 | 850 | -614,20m | 13,95μ | 575,50k |
| 5 | 35 | 5 | 730 | -605,70m | 2,561μ | 558,50k |
| 6 | 35 | 5 | 850 | -598,00m | 231,90n | 18,99M |
| 7 | 35 | 15 | 730 | -618,10m | 14,85μ | 370,90k |
| 8 | 35 | 15 | 850 | -593,30m | 54,31μ | 70,43k |
| 9 | 25 | 10 | 790 | -557,81m | 4,36n | 134,86M |
| 10 | 25 | 10 | 790 | -552,50m | 19,93n | 166,60M |
| 11 | 25 | 10 | 790 | -569,30m | 11,35n | 144,00M |

Fonte: O autor, 2024.

A partir dos dados apresentados na Tabela 3, foi observado que os experimentos 8 e 10 apresentaram o pior e melhor resultado, respectivamente, para resistência à polarização, quando comparados à amostra de referência (experimento 0). Desta forma, a discussão dos resultados foi realizada a partir do comportamento dos experimentos 8 e 10, em relação ao experimento 0.

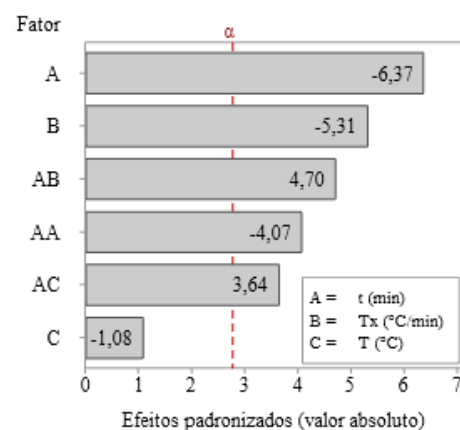
Efeito das variáveis de entrada sobre o potencial de corrosão (Ecorr)

Os resultados apresentados na Tabela 3 para os valores de Ecorr, variaram entre -520,63 mV e -618,10 mV. O valor obtido para Ecorr do experimento 0, foi similar a valores encontrados na literatura, para a amostra com tratamento Thermex⁵.

A Figura 3 apresenta o Diagrama de Pareto, no qual observa-se que as variáveis tempo (t) e taxa de aquecimentos e as interações t*Tx e t*T apresentam efeito estatisticamente significativos na variável de resposta Ecorr, ou seja, possui efeito com valor absoluto maior que o definido pela linha de referência α , que possui nível de significância (α) menor ou igual a 0,05 e apresenta uma probabilidade

de 95% de influência sobre Ecorr. O t representa o fator de maior influência sobre o Ecorr, seguido por Tx, t*Tx, t² e t*T. A temperatura de permanência (T) não possui efeito significativo sobre Ecorr, pois não ultrapassou a linha de referência α . Os valores negativos representado no diagrama de Pareto, significam uma relação inversa entre as variáveis de entrada e a variável de resposta, ou seja, quanto menor o valor da variável de entrada, maior será o valor da variável de resposta⁴.

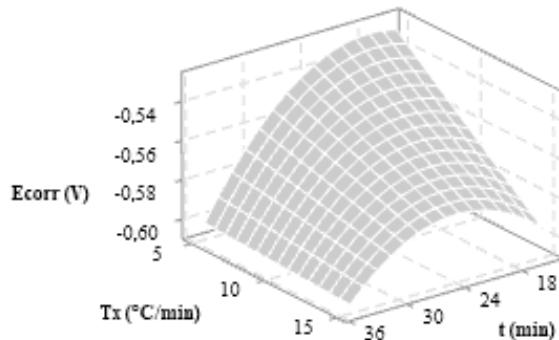
Figura 3 – Diagrama de Pareto dos efeitos padronizados à Ecorr ($\alpha = 0,05$)



Fonte: O autor, 2024.

A partir dos resultados obtidos, também foi construída a superfície de resposta para o E_{corr} , ilustrada através da Figura 4, fixando a temperatura (T) em 790°C e variando a taxa de aquecimento (T_x) e o tempo de permanência (t).

Figura 4 – Superfície de resposta E_{corr} , sob influência de t e T_x , com $T = 790^{\circ}\text{C}$



Fonte: O autor, 2024.

Na Figura 4, observa-se que os melhores valores para E_{corr} foram obtidos quando T_x foi de $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ e o t foi menor que 20 min, atingindo E_{corr} máximo próximo de -535 mV . O valor de -535 mV é um valor próximo a média dos resultados de E_{corr} obtidos nos experimentos 1 e 2, em condições similares.

O modelo matemático obtido para E_{corr} é apresentado na equação 1, sem desconsiderar o termo de menor significância T , pois existe uma relação estatisticamente significativa entre $t*T$.

$$E_{corr} (V) = -0,129 - 0,00786*t - 0,01084*T_x - 0,000539*T - 0,000247*t*t + 0,000299*t*T_x + 0,000019*t*T \quad (1)$$

Os termos presentes na equação, são os seguintes: T_x = taxa de aquecimento; T = temperatura de patamar; t = tempo de permanência; $t*t$, $t*T_x$ e $t*T$; são as interações entre as variáveis.

Na Tabela 4 está descrito os resultados da análise de variância, para o modelo obtido. O Valor-P do modelo foi de 0,006. O que significa dizer que o modelo explica variações na resposta E_{corr} , uma vez que $\text{Valor-p} \leq \alpha = 0,05$. A equação 1,

apresenta coeficiente de determinação (R^2) igual a 96,82%, ou seja, 96,82% das variações para E_{corr} são explicadas pelo modelo obtido. Para fins preditivos o modelo possui $R^2(\text{pred})$ igual a 74,01%, ou seja, o modelo consegue prever o comportamento de E_{corr} em 74,01% das vezes, com 95% de confiança⁴.

Tabela 4 - Análise de variância (ANOVA) para E_{corr}

| Fonte | GL | SQ (Aj.) | QM (Aj.) | Valor F | Valor-P |
|--------|----|----------|----------|---------|---------|
| Modelo | 6 | 0,0098 | 0,0016 | 20,31 | 0,006 |
| Erro | 4 | 0,0003 | 0,0001 | | |
| Total | 10 | 0,0101 | | | |

Fonte: O autor, 2024.

Efeito das variáveis de entrada sobre a corrente de corrosão (i_{corr})

Os resultados apresentados na Tabela 3 para os valores de i_{corr} , variaram entre $4,36\text{ nA}$ e $54,31\text{ }\mu\text{A}$. O valor obtido para i_{corr} do experimento 0, foi significativamente menor aos valores encontrados na literatura⁵. Essa diferença pode estar relacionada a condições distintas dos procedimentos experimentais, variações na composição química do material, diferenças no processo produtivo do aço ou até mesmo fatores desconhecidos, podem influenciar nos resultados.

Na análise estatística realizada para identificar os fatores com efeitos significativos ($\text{Valor-p} \leq \alpha = 0,05$) sobre i_{corr} , foi observado que nenhum dos fatores de entrada apresentou efeitos significativos sobre a variável de resposta. Desta forma, não foi possível construir um modelo estatisticamente significativo para predição do comportamento de i_{corr} . Esse resultado indica que fatores não considerados neste estudo podem descrever com maior confiabilidade o comportamento de i_{corr} .

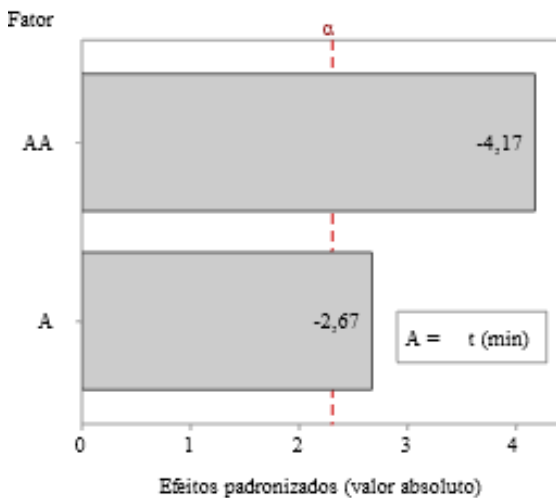
Efeito das variáveis de entrada sobre a resistência a polarização (R_p)

Os resultados apresentados na Tabela 3 para os valores de R_p variaram entre $70,43\text{ k}\Omega$ e $166,60\text{ M}\Omega$. O valor obtido

para R_p no experimento 0 foi significativamente maior aos valores encontrados na literatura⁵.

A análise estatística revelou que o tempo de permanência (t) é o único fator com efeito significativo sobre a resistência à polarização (R_p) (Valor-p $\leq \alpha = 0,05$), como pode ser visto na Figura 5.

Figura 5 – Diagrama de Pareto dos efeitos padronizados à R_p ($\alpha = 0,05$)



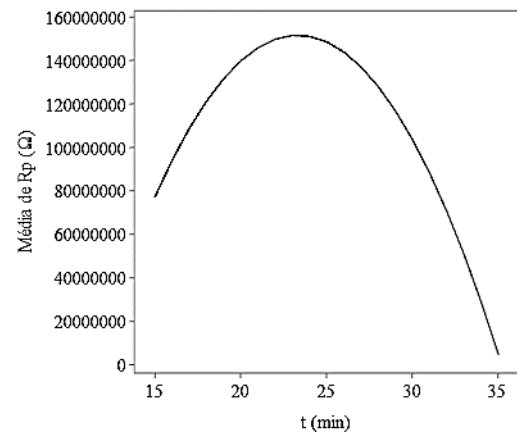
Fonte: O autor, 2024.

Os valores negativos representados no diagrama de Pareto, indicam uma relação inversa existente entre os fatores e a variável de resposta R_p ⁴. O modelo matemático obtido para R_p é apresentado na equação 2.

$$R_p(\Omega) = -433621564 + 50169496*t - 1075353 t*t \quad (2)$$

Os termos presentes na equação, são os seguintes: t = tempo de permanência; $t*t$ = interação quadrática de t . Como a R_p está sobre a influência significativa de apenas um termo, não foi possível construir uma superfície de resposta. Entretanto, o gráfico que descreve o comportamento de R_p em função do tempo pode ser visto na Figura 6.

Figura 6 – Gráfico de efeitos principais para R_p (Ω)



Fonte: O autor, 2024.

Na Tabela 5, estão descritos os resultados da análise de variância para o modelo obtido. O Valor-P do modelo foi de 0,004, o que indica que o modelo explica variações na resposta R_p , uma vez que Valor-p $\leq \alpha = 0,05$. A equação 2 apresenta coeficiente de determinação (R^2) igual a 75,44%, ou seja, 75,44% das variações para R_p são explicadas pelo modelo obtido. Para fins preditivos, o modelo possui $R^2(\text{pred})$ igual a 55,79%, o que significa que ele consegue prever o comportamento de R_p em 55,79% dos casos, com 95% de confiança⁴.

Tabela 5 - Análise de variância (ANOVA) para R_p

| Fonte | GL | SQ (Aj.) | QM (Aj.) | Valor F | Valor-P |
|--------|----|----------|----------|---------|---------|
| Modelo | 2 | 3,6E+16 | 1,8E+16 | 12,3 | 0,004 |
| Erro | 8 | 1,2E+16 | 1,5E+15 | | |
| Total | 10 | 4,7E+16 | | | |

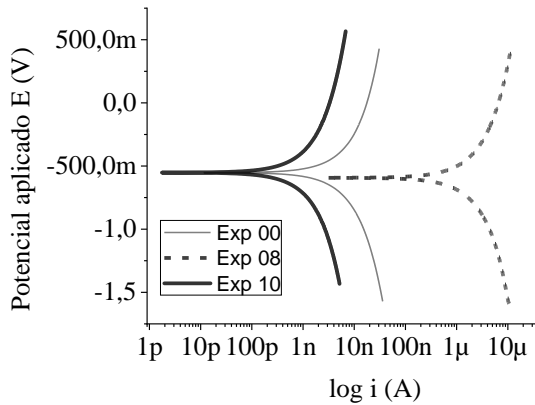
Fonte: O autor, 2024.

Resistência a corrosão

A resistência a corrosão para cada experimento foi mensurada a partir técnica de polarização potenciodinâmica linear (PPL) e, para confirmação dos resultados, foi utilizada a técnica de espectroscopia de impedância eletroquímica (EIE). A Figura 7 apresenta as curvas de polarização potenciodinâmica dos experimentos 0

(amostra de referência), e dos experimentos 10 e 8, que apresentaram maior e menor resistência a polarização, respectivamente.

Figura 7 – Curva de polarização dos experimentos 0, 8 e 10



Fonte: O autor, 2024.

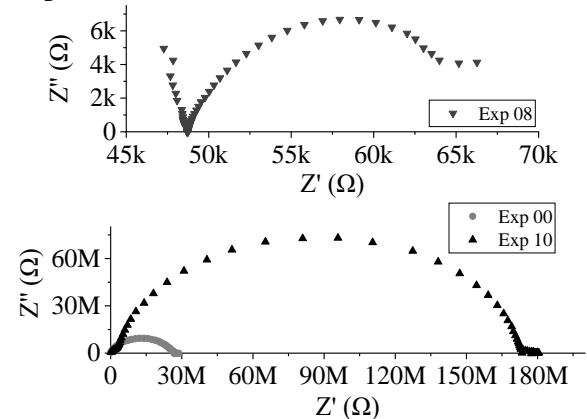
O experimento 10 apresentou uma maior resistência a polarização (R_p), correspondendo a $166,60 \text{ M}\Omega$, enquanto a amostra de referência 0 apresentou o valor igual a $30,49 \text{ M}\Omega$, indicando uma maior resistência a corrosão. Por outro lado, os resultados referente ao potencial de corrosão (E_{corr}) de ambas amostras foram próximos, sendo: $-552,50 \text{ mV}$ para o experimento 10 e $-552,30 \text{ mV}$ para o experimento 0. A corrente de corrosão (i_{corr}) da amostra 10 foi de $19,93 \text{ nA}$, resultado muito menor que o da amostra 0 ($173,60 \text{ nA}$), confirmando que o experimento 10 tratado termicamente possui uma maior resistência a corrosão, ou seja, uma maior dificuldade de passagem de elétrons.

O experimento 8 apresentou a menor resistência a corrosão, com uma R_p igual a $70,43 \text{ k}\Omega$, resultado foi muito inferior ao da amostra de referência 0 ($30,49 \text{ M}\Omega$). O valor do E_{corr} variou de $-552,30 \text{ mV}$, no experimento 0, para $-593,30 \text{ mV}$, no experimento 8. A corrente de corrosão (i_{corr}) da amostra 8 foi de $54,31 \text{ }\mu\text{A}$, resultado muito maior que o da amostra 0 ($173,60 \text{ nA}$).

A Figura 8 apresenta as curvas de impedância para as amostras 0, 8 e 10. O

gráfico de impedância indica que quanto maior a largura do arco formado, no eixo real (Z'), maior será a resistência a corrosão.

Figura 8 – Curva de impedância dos experimentos 0, 8 e 10



Fonte: O autor, 2024.

Os resultados apresentados na Figura 8 confirmam os valores encontrados pela PPL, indicando que o tratamento térmico empregado no experimento 10 aumentou resistência a corrosão em comparação com o experimento 0, enquanto que o experimento 8 reduziu a resistência a corrosão.

Na curva de EIE, do experimento 8, foi visto a formação de dois arcos capacitivos, em que o primeiro pode estar relacionado com a resistência do eletrólito ou a uma reação eletroquímica em duas etapas^{5,6}.

Caracterização morfológica

A partir da análise da micrografia do vergalhão CA-50, aço 1020, observou-se, por meio da Figura 2, a morfologia e microestrutura antes e após o tratamento térmico. Foram identificadas variações morfológicas significativas, desde o centro da amostra até a superfície.

A variação dos parâmetros do tratamento térmico realizado induziu alterações significativas na morfologia da microestrutura do aço, promovendo alterações nos resultados das medidas eletroquímica de corrosão.

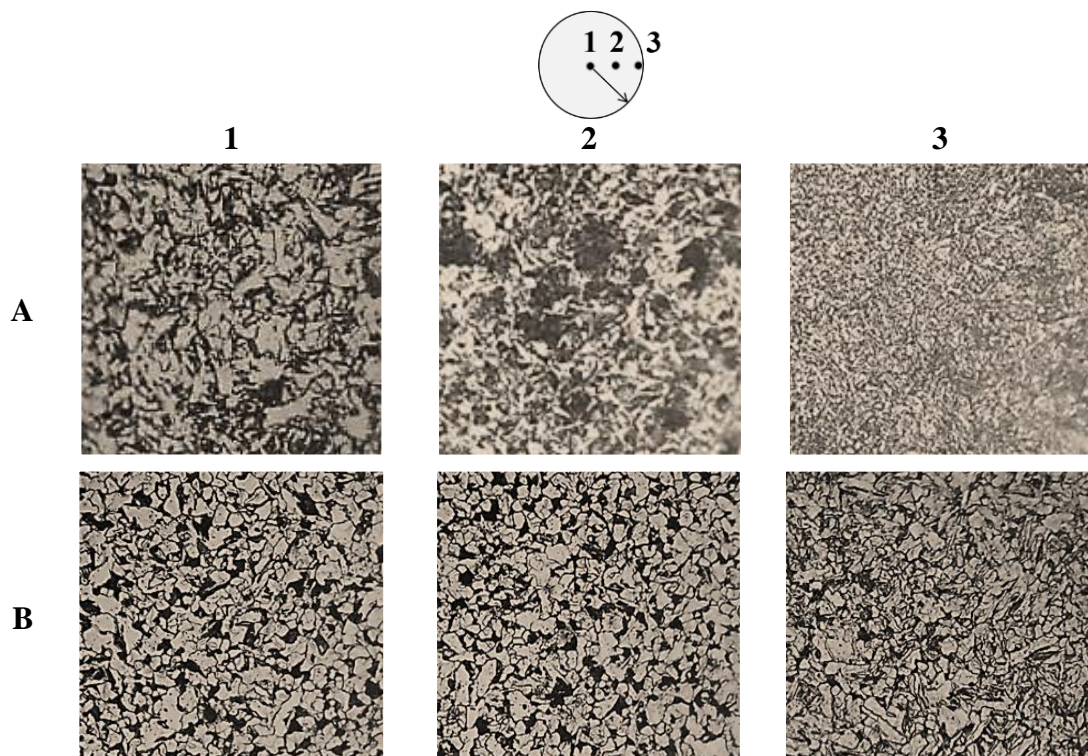
A Figura 2A apresenta a mudança da morfologia do aço, da amostra 0, sem tratamento térmico, ao longo do raio do corpo de prova, partindo do centro até a superfície (borda), nos pontos 1, 2 e 3.

Nas bordas, ponto 3, é possível observar grãos mais refinados, evidenciando um crescimento controlado devido ao resfriamento rápido. Esse processo favorece uma alta taxa de nucleação e crescimento restrito, indicando assim uma maior resistência mecânica. Como consequência, pode haver a presença de estrutura martensítica em forma de pequenas ripas. O tratamento térmico realizado na produção do vergalhão CA-50, conhecido como Thermex, envolve o rápido resfriamento superficial, com objetivo de promover a formação de estruturas martensíticas, resultantes da transformação da austenita em martensita na região superficial. Por outro lado, o núcleo do vergalhão CA-50, ainda quente, alivia as tensões residuais geradas pelo resfriamento

rápido e formação da martensita, originando uma zona de transição composta de bainita e perlita. O resfriamento mais lento do núcleo forma ferrita e perlita na região central do vergalhão^{3,5,7,8,9}.

Na Figura 2B, observa-se a amostra referente ao experimento 10, a qual apresenta alterações no tamanho dos grãos nos pontos 1, 2 e 3, devido ao efeito do tratamento térmico, sendo assim possível verificar uma maior concentração de ferrita, quando comparada a amostra de referência 0. A taxa de aquecimento de 10 °C/min, a temperatura de patamar de 790°C e o tempo de permanência de 25 minutos permitiu o crescimento controlado dos grãos, resultando em uma distribuição granulométrica homogênea. Durante o ciclo térmico do tratamento térmico, as fases perlíticas, bainíticas e martensíticas, foram austenitizadas e, posteriormente, transformaram-se em perlita e ferrita durante o resfriamento^{3,7}.

Figura 2 – Microscopia óptica: (2A) experimento 0; (2B) experimento 10; (2C) experimento 08.





Fonte: O autor, 2024.

Na Figura 2 (c), foi observado que a amostra 8 apresentou alterações morfológicas significativas nos pontos 1, 2 e 3, em comparação com a amostra de referência 0. A taxa de aquecimento de 15°C/min, a temperatura de patamar de 850°C e o tempo de permanência de 35 minutos favoreceu o crescimento acentuado dos grãos, resultando em uma estrutura de grãos mais grosseiros e até coalescida. Durante o tratamento térmico, devido à alta temperatura de patamar, a amostra quase foi totalmente austenitizada, transformando-se em perlita e ferrita durante o resfriamento^{3,7}.

Os resultados obtidos na análise eletroquímica de corrosão, estão relacionados com a microestrutura do aço, vergalhão CA-50, pois a composição química e outros fatores exercem influência significativa sobre a taxa e o tipo de corrosão que o metal pode sofrer¹⁰. Estudos afirmam que estruturas ferríticas/perlíticas quando refinadas, apresentam melhor resistência a corrosão quando comparada a estruturas martensíticas. A heterogeneidade do material facilita a formação de áreas com potenciais diferentes, o que favorece a corrosão em meio aquoso. Aços de baixo carbono, que apresentam maior fração de ferrita, apresentam menor suscetibilidade a corrosão, uma vez que ela possui menor concentração de carbono e atua como ânodo, enquanto que estruturas com maior concentração de carbono atuam como cátodo e, estão distribuídas em frações menores pelo material^{11,12}.

Materiais com estrutura martensítica, devido ao carbono retido na

sua estrutura e ao acúmulo de energia interna, apresentam maior reatividade e suscetibilidade a corrosão^{12,13,14}.

O tamanho dos grãos, a densidade de contornos de grãos, a energia superficial e as tensões internas, apresentam influência significativa sobre resistência a corrosão^{13,14,15,16}. Alguns estudos afirmam que, quanto menor o tamanho dos grãos, maior é a suscetibilidade do material a corrosão devido a sua maior energia superficial e menor resistência a corrosão^{13,16}. Entretanto, há estudos que afirmam que grãos refinados pode beneficiar a resistência a corrosão, uma vez que a alta densidade de contornos de grão contribui para a formação de um filme passivo com maior velocidade, desde que o material seja capaz de formar um filme passivo estável^{15,17,18,19}. Desta forma, é possível afirmar que o crescimento acentuado dos grãos, além de reduzir a densidade de contornos de grãos, reduz a reatividade do material, o que pode dificultar a formação de filmes de passivação e favorecer a iniciação e propagação da corrosão no material.

CONCLUSÕES

- A análise estatística mostrou que o tempo de permanência (t) e a taxa de aquecimento (Tx) são os principais fatores de influência sobre o potencial de corrosão (E_{corr}), apresentando uma relação inversa: à medida que os valores de t e Tx diminuem, o valor de E_{corr} aumenta.

- A resistência à polarização (R_p) foi significativamente afetada pelo tempo de permanência (t), exibindo uma relação inversa: à medida que o tempo de permanência ultrapassa 25 minutos, a resistência a corrosão tende a diminuir.
- As amostras tratadas termicamente nas condições experimentais 8 e 10 apresentaram diferenças significativas na resistência à corrosão, diretamente relacionadas às suas respectivas microestruturas.
- A partir dos resultados obtidos neste estudo e na literatura, é possível afirmar que existe uma faixa ótima de distribuição granulométrica nos materiais que maximiza a resistência a corrosão.
- Diante desses resultados, evidencia-se a importância da otimização dos parâmetros de tratamento térmico para melhorar o controle e previsão da resistência a corrosão nos aços.

PERSPECTIVAS

Estudos futuros podem ser desenvolvidos para investigar:

- fatores que influenciam o comportamento da corrente de corrosão (i_{corr});
- avaliar o comportamento mecânico através da microdureza.

O avanço desses estudos pode contribuir para novas aplicações para esses aços.

REFERÊNCIAS

1 NASCIMENTO, Eberto Roque dos Santos; FONTES, Michel Diego de Santana. Patologias das estruturas de concreto armado. **Revista FATEC de tecnologia e ciências**, v. 6, n. 1, 2021. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/611672368/Artigo-Patologias-nas-Estruturas-de-Concreto-Armado>. Acesso em: 20 jun. 2024.

2 ROCHA, Otávio Fernandes Lima da. **Conformação mecânica**. Belém: IFPA; Santa Maria: UFSM, 2012. Disponível em: https://redeetec.mec.gov.br/images/stories/pdf/eixo_ctrl_proc_indust/tec_metal/conform_mec/161012_confor_mec.pdf. Acesso em: 21 jun. 2024.

3 GERDAU. **Tratamentos Térmicos**. [S. l.]: USP [e-Disciplinas]: [2023?]. *E-book*. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4354027/mod_resource/content/3/Aula%20-%20Tratamentos%20T%C3%A9rmicos.pdf. Acesso em: 20 jun. 2024.

4 INTERPRETAR os principais resultados para Análise de experimento fatorial. [S. l.]: Minitab, [2024?]. *Blog*. Disponível em: <https://support.minitab.com/pt-br/minitab/help-and-how-to/statistical-modeling/doe/how-to/factorial/analyze-factorial-design/interpret-the-results/key-results/>. Acesso em: 25 jul. 2024.

5 SOUZA, Vitória Lima de. **Efeito do tratamento térmico thermex via laminação a quente na resistência à corrosão do vergalhão CA-50**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Metalúrgica) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2021. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/64662/3/2021_tcc_vlsouza.pdf. Acesso em: 25 jul. 2024.

6 WOLYNEC, Stephan. **Técnicas eletroquímicas em corrosão**. São Paulo: EDUSP, 2003.

7 SANTOS, R. G. d. **Transformações de Fases em Materiais Metálicos**. Campinas: UNICAMP, 2006. Disponível em: <https://pdfcoffee.com/-transformacoes-de-fases-em-materiais-metalicos-pdf-free.html>. Acesso em: 25 jul. 2024.

- 8 KABIR, Mohammad Sharear; ISLAM, Md Moinul; BEPARI, Md Mohar Ali. Impact Toughness of Concrete Reinforcement Bars Produced by the THERMEX Process and Ordinary Rolling Process. **International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering**, [S. l.], v. 4, p. 53-59, jul. 2014. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Mohammad-Sharear-Kabir/publication/273205114_Impact_Toughness_of_Concrete_Reinforcement_Bars_Produced_by_the_THERMEX_Process_and_Ordinary_Rolling_Process/links/54fbd0f80cf270426d0e884c/Impact-Toughness-of-Concrete-Reinforcement-Bars-Produced-by-the-THERMEX-Process-and-Ordinary-Rolling-Process.pdf. Acesso em: 25 jul. 2024.
- 9 SELZER, Jacob. Quenched and tempered bar. **Iron Steel Technology**, v. 9, n. 8, p. 120-126, 2012. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/285270540/Quenched-and-Tempered-Bar>. Acesso em: 26 jul. 2024.
- 10 BLIKHARSKYY, Y.; SELEJDAK, J.; KOPIKA, N. Specifics of corrosion processes in thermally strengthened rebar. Case Studies in Construction Materials, **Elsevier**, v. 15, dez. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509521001613>. Acesso em: 25 jul. 2024.
- 11 AL-RUBAIEY, S. I.; ANOON, E. A.; HANOON, M. M. The Influence of Microstructure on the Corrosion Rate of Carbon Steels, **Eng. & Tech. Journal**, Baghdad, v. 31, n. 10, p.1825-1836, jan. 2013. Disponível em: [https://www.uotechnology.edu.iq/tech_mag/az/2013/No.10.A.2013/Text\(2\).pdf](https://www.uotechnology.edu.iq/tech_mag/az/2013/No.10.A.2013/Text(2).pdf). Acesso em: 25 jul. 2024.
- 12 REMMERSWAAL, T. **The influence of microstructure on the corrosion behaviour of ferritic-martensitic steel**, 93 f. Thesis (Master's Degree in Science) - Delft University Of Technology, Delft, 2015. Disponível em: https://repository.tudelft.nl/file/File_2e7d67a4-8f2b-4464-a2cc-b776303c6979?preview=1. Acesso em: 25 jul. 2024.
- 13 HINCAPIE-LADINO, Duberney, *et. al.* Influência da microestrutura sobre a resistência à corrosão de um aço microligado. *In*: CONGRESSO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA, MATERIAIS E MINERAÇÃO, v. 69, n. 69, 2014. **Anais** [...]. São Paulo: ABM, 2014. Disponível em: <https://abmproceedings.com.br/ptbr/article/influncia-da-microestrutura-sobre-a-resistencia-corroso-de-um-ao-microligado>. Acesso em 26 jul. 2024.
- 14 CANDELARIA, A. F.; PINEDO, C. E.; PANONI, F. D. **Influência do tratamento térmico na resistência à corrosão do aço inoxidável martensítico tipo AISI 420**. São Paulo: Heat Tech, [2002]. *Online*. Disponível em: <https://www.heattech.com.br/trabalhos/2002%20-%20CBECIMAT%20-%20PN%20AISI%20420.pdf>. Acesso em: 25 jul. 2024.
- 15 TORRES, ANA de A.; CORREA, OLANDIR V.; ANTUNES, RENATO A. Influência do tamanho de grão sobre a resistência à corrosão do aço inoxidável AISI 304. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIAS DO MATERIAIS, 22., 2016, Natal, RN. **Anais** [...]. Natal, RN: Ipen, 2016. Disponível em: <http://repositorio.ipen.br/handle/123456789/27292>. Acesso em: 25 jul. 2024.
- 16 VIEIRA, Matheus de Lima; SILVA, Francisco Alberto Marreiros da Rocha da; FLÓREZ, Mauro Andrés Cerra; SILVA, Marcelo José Gomes da; ARAÚJO, Walney Silva. Estudo da resistência à corrosão entre vergalhões com diferentes microestruturas

frente aos íons cloretos. *In*: CONGRESSO ANUAL DA ABM – INTERNACIONAL, 72.; ENCONTRO NACIONAL DE ESTUDANTES DE ENGENHARIA METALÚRGICA, DE MATERIAIS E DE MINAS – ENEMET, 17., out. 2017, São Paulo, SP. **Anais** [...], São Paulo, v. 72, n. 72, p. 1453-1463, 2017. Disponível em: <https://abmproceedings.com.br/ptbr/article/estudo-da-resistencia-a-corrosao-entre-vergalhoes-com-diferentes-microestruturas-frente-aos-ions-cloretos>. Acesso em: 25 jul. 2024.

17 PEREIRA, Estephane Diana Ferreira. **Influência dos tratamentos térmicos no comportamento à corrosão do aço 1045**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal do Maranhão, 2023. Disponível em: <https://monografias.ufma.br/jspui/handle/123456789/7283>. Acesso em: 24 jul. 2024.

18 ALHARBI, Sayer Obaid *et. al.* The corrosion behavior of low carbon steel (AISI 1010) influenced by grain size through microstructural mechanical. **Scientific Reports**, [S. l.], v. 14, n. 1, p. 5098, mar. 2024. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-023-47744-y#citeas>. Acesso em 24 jul. 2024.

19 ZHENG, Z. J.; GAO, Y.; GUI, Y.; ZHU, M. Corrosion behaviour of nanocrystalline 304 stainless steel prepared by equal channel angular pressing. **Corrosion Science**, v. 54, p. 60-67, jan. 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0010938X11004732>. Acesso em: 25 jul. 2024.

20 CALLISTER Jr., W. D. **Ciência e engenharia de materiais**: Uma introdução. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

AGRADECIMENTOS

O autor agradece ao Laboratório de Corrosão da Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho (UACSA) da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE). Agradece, em especial, ao Prof. Aureliano X. dos Santos pelas orientações prestadas para a realização deste estudo, ao Prof. Thiago A. Simões pelo aporte financeiro através do Projeto Inova Nióbio 2022 (Processo nº 408905/2022-0) e a José Webson pela valiosa contribuição na execução dos experimentos.