REVISTA TÓPICOS
ISSN 2965-6672 | Qualis A2

COMPORTAMENTO CORROSIVO DOS AÇOS SAE 10B22 E SAE 1080 EM MEIO SULFÚRICO: EFEITOS DA CONCENTRAÇÃO ÁCIDA E DOS TRATAMENTOS TÉRMICOS

CORROSIVE BEHAVIOR OF SAE 10B22 AND SAE 1080 STEELS IN SULFURIC ACID MEDIUM: EFFECTS OF ACID CONCENTRATION AND HEAT TREATMENTS

Engenharias • 04/11/2026

REGISTRO DOI: 10.70773/revistatopicos/793512481

Fabrícia Nunes de Jesus[1]

Lucas Moraes Artuso[2]

Pedro Henrique Duarte Andrade[3]

Agostinho Ferreira[4]

RESUMO

Este estudo avaliou, por ensaio gravimétrico de imersão durante 90 dias, o comportamento corrosivo dos aços SAE 10B22 e SAE 1080 em soluções de H_2SO_4 a 1,5; 3,0 e 4,0% (v/v), comparando amostras sem tratamento térmico e amostras submetidas à têmpera seguida de revenimento. A taxa de corrosão foi estimada a partir da perda de massa e da área exposta; a morfologia superficial foi examinada por microscopia óptica, e foram realizados ensaios de microdureza e, para o SAE 10B22, de tração. Nas amostras sem tratamento, a taxa média aumentou de 10,87 para 24,26 mpy no SAE 10B22 e de 9,97 para 26,50 mpy no SAE 1080 entre 1,5 e 4,0% de H_2SO_4. Nas seis combinações de aço e concentração, a condição temperada e revenida apresentou taxas médias 15,9–29,7% inferiores às das amostras sem tratamento. As comparações reportadas indicaram diferenças entre tratamentos em cada combinação ($p = 0,005–0,018$), enquanto não foi detectada diferença estatisticamente significativa entre os aços em cada concentração.

A microscopia mostrou diferenças qualitativas na aparência do ataque, mas a avaliação foi limitada a uma amostra por condição e ampliação de 5×. A microdureza aumentou no SAE 10B22 após a têmpera e diminuiu no SAE 1080; portanto, não é possível atribuir a redução da taxa de corrosão, de forma conclusiva, à formação de martensita revenida. Os resultados indicam associação entre o tratamento térmico aplicado e menor taxa gravimétrica de corrosão nas condições ensaiadas, mas a confirmação dos mecanismos requer caracterização microestrutural e maior controle da preparação superficial e da limpeza pós-ensaio.

Palavras-chave: Corrosão; Ácido sulfúrico; Aço SAE 10B22; Aço SAE 1080; Tratamento térmico.

ABSTRACT

This study evaluated the corrosion behaviour of SAE 10B22 and SAE 1080 steels by 90-day immersion mass-loss testing in H_2SO_4 solutions at 1.5, 3.0 and 4.0% (v/v), comparing untreated specimens with specimens subjected to quenching followed by tempering. Corrosion rate was estimated from mass loss and exposed area; surface morphology was examined by optical microscopy, and microhardness and tensile tests were performed, the latter only for SAE 10B22. For untreated specimens, the mean corrosion rate increased from 10.87 to 24.26 mpy for SAE 10B22 and from 9.97 to 26.50 mpy for SAE 1080 between 1.5 and 4.0% H_2SO_4. Across the six steel–concentration combinations, quenched-and-tempered specimens showed mean rates 15.9–29.7% lower than untreated specimens. The reported pairwise comparisons indicated differences between treatments for each combination ($p = 0.005–0.018$), whereas no statistically significant difference between steels was detected at each concentration. Microscopy showed qualitative differences in attack appearance, but the assessment was limited to one specimen per condition at 5× magnification. Microhardness increased after quenching in SAE 10B22 and decreased in SAE 1080; consequently, the lower corrosion rates cannot be conclusively attributed to the formation of tempered martensite. The results indicate an association between the applied heat treatment and lower gravimetric corrosion rates under the tested conditions; however, confirmation of the mechanisms requires microstructural characterization and better control of surface preparation and post-test cleaning.

Keywords: Corrosion; Sulfuric acid; SAE 10B22 steel; SAE 1080 steel; Heat treatment.

1. INTRODUÇÃO

Os aços são amplamente empregados em componentes estruturais e de fixação devido à combinação de resistência mecânica, disponibilidade e custo. A corrosão pode comprometer a integridade desses componentes e gerar custos de manutenção e substituição. O estudo IMPACT, divulgado pela NACE International, estimou o custo global da corrosão em aproximadamente US$ 2,5 trilhões por ano, equivalente a cerca de 3,4% do produto interno bruto mundial, e indicou que práticas de gestão da corrosão poderiam reduzir parte desse custo (Nace International, 2016). Embora esse valor seja uma estimativa global e não específica para os materiais aqui estudados, ele contextualiza a relevância industrial do tema.

Em soluções ácidas, a dissolução do ferro pode ocorrer pela reação anódica $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^{-}$, acoplada à redução catódica de H^{+} com formação de hidrogênio. A velocidade global depende, entre outros fatores, da composição e microestrutura do aço, da concentração e temperatura do eletrólito, da razão entre volume de solução e área exposta, da aeração e da evolução da composição da solução durante o ensaio (Gemelli, 2001; Gentil, 2022; ASTM International, 2025b). Em componentes de fixação, o contato com soluções ácidas também é relevante em operações de decapagem, nas quais a entrada de hidrogênio pode contribuir para fragilização sob determinadas condições (Chen et al., 2016).

Os aços SAE 10B22 e SAE 1080 diferem principalmente pelo teor nominal de carbono e pela presença de boro no primeiro. O SAE 10B22 é um aço de baixo carbono microligado ao boro, utilizado em aplicações que exigem temperabilidade para fabricação de fixadores; o SAE 1080 é um aço de alto carbono, cuja resposta ao tratamento térmico depende da composição efetiva, do tamanho de grão austenítico, do ciclo térmico e da severidade de resfriamento.

Como a composição química dos lotes empregados neste estudo não foi determinada, os valores apresentados na Tabela 1 devem ser interpretados como faixas nominais, e não como análise química dos corpos de prova.

A literatura demonstra que o efeito do tratamento térmico sobre a corrosão não é universal: depende da microestrutura resultante e do meio corrosivo. Em aço EN8 de estrutura ferrita–martensita, Prabhu, Jomy e Prabhu (2022) combinaram gravimetria, polarização potenciodinâmica, espectroscopia de impedância e caracterização de superfície em H_2SO_4 0,5 M, observando que a taxa de corrosão variou com a temperatura de austenitização e com a fração de fases. Os autores discutem a possibilidade de acoplamento microgalvânico entre ferrita e martensita. Esse resultado sustenta a necessidade de não generalizar a relação entre dureza e resistência à corrosão: a resposta depende das fases, de suas interfaces e das condições de ensaio. Estudos com outros aços e eletrólitos podem oferecer contexto, mas não são diretamente equivalentes ao sistema e às concentrações empregados aqui.

Diante desse contexto, o objetivo deste trabalho foi comparar as taxas gravimétricas de corrosão dos aços SAE 10B22 e SAE 1080 após 90 dias de imersão em soluções de H_2SO_4 a 1,5; 3,0 e 4,0% (v/v), avaliando a associação entre o tratamento de têmpera e revenimento e a taxa e a aparência superficial do ataque. A análise foi complementada por medidas de microdureza e, para o SAE 10B22, por ensaios de tração. As concentrações foram adotadas como condições experimentais de severidade crescente; o ensaio não deve ser interpretado como reprodução direta de chuva ácida nem como simulação validada de uma aplicação industrial específica.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA OU REVISÃO DA LITERATURA

2.1. Aços SAE 10B22 e SAE 1080

De acordo com a ArcelorMittal (2013), o SAE 10B22 é um aço ao boro para têmpera, de alta temperabilidade, e o SAE 1080 é um aço carbono de alto teor de carbono, com as composições nominais apresentadas na Tabela 1. O boro segrega para os contornos de grão da austenita, onde reduz a energia interfacial e dificulta a nucleação da ferrita, o que favorece a transformação martensítica (Casarin, 1996). A eficácia do boro depende, entretanto, do teor de carbono, do tamanho de grão austenítico e da temperatura de austenitização (Casarin, 1996; Hwang; Suh; Kim, 2011).

Tabela 1. Composição química nominal dos aços (% em massa)

Aço	C	Mn	Si	Cr	B
SAE 10B22	0,19 a 0,23	1,05 a 1,25	0,15 a 0,30	0,10 a 0,20	0,001 0,00
SAE 1080	0,75 a 0,88	0,60 a 0,90	n.e.	n.e.	n.e.

⚠ Esta tabela possui muitas colunas e foi cortada para impressão. Para visualizá-la completa, acesse o artigo original em: https://revistatopicos.com.br/artigos/comportamento-corrosivo-dos-acos-sae-10b22-e-sae-1080-em-meio-sulfurico-efeitos-da-concentracao-acida-e-dos-tratamentos-termicos?noblockage

Nota: n.e.: não especificado. Valores nominais; a composição dos lotes utilizados não foi determinada.
Fonte: ArcelorMittal (2013).

2.2. Corrosão em Meio Ácido e Taxa de Corrosão

Em meio sulfúrico aquoso, a dissolução anódica do ferro pode ser representada por $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^{-}$, enquanto a reação catódica predominante em condições suficientemente ácidas pode envolver $2H^{+} + 2e^{-} \rightarrow H_2$. A reação global simplificada é $Fe + H_2SO_4 \rightarrow FeSO_4 + H_2$, embora a química efetiva da solução e os produtos formados dependam das condições do ensaio. O ataque pode apresentar distribuição aproximadamente uniforme ou concentração localizada em cavidades e regiões específicas. A observação visual da superfície permite descrever a aparência do ataque, mas não substitui a medição de profundidade ou a caracterização em seção transversal.

A taxa de corrosão por perda de massa, em ensaios de imersão, pode ser expressa como taxa de penetração (Callister, 2012):

$$TPC = K \cdot W / (\rho \cdot A \cdot t) \quad (1)$$

em que W representa a perda de massa, ρ a massa específica, A a área exposta e t o tempo de exposição. A constante K depende das unidades utilizadas; para obter mpy, deve-se assegurar a consistência entre massa, densidade, área e tempo. A taxa de penetração é uma média equivalente e não descreve, isoladamente, a profundidade máxima de cavidades localizadas. A ASTM G31 orienta o planejamento de ensaios de imersão, incluindo composição da solução, temperatura, volume, duração e limpeza; a ASTM G1 descreve práticas para remoção dos produtos de corrosão com minimização da remoção do metal-base (ASTM International, 2025a, 2025b).

2.3. Têmpera, Revenimento e Comportamento Corrosivo

A têmpera consiste no resfriamento rápido do aço a partir da região austenítica, podendo favorecer a formação de martensita; o

resultado depende da composição, da temperatura e do tempo de austenitização e da taxa efetiva de resfriamento. O revenimento subsequente pode reduzir tensões e modificar a dureza e a distribuição de carbonetos. Como diferentes fases e interfaces podem alterar a cinética eletroquímica, o efeito do tratamento sobre a corrosão não pode ser previsto apenas a partir da dureza. A identificação das fases formadas neste estudo permanece uma hipótese, não uma conclusão experimental, visto não terem sido realizadas análises de caracterização microestrutural.

3. METODOLOGIA

3.1. Materiais e Preparação dos Corpos de Prova

Os aços SAE 10B22 e SAE 1080 foram fornecidos na forma de bobinas de fio-máquina, com diâmetro nominal de aproximadamente 6 mm, por uma empresa siderúrgica localizada em João Monlevade, Minas Gerais, Brasil. As bobinas foram seccionadas mecanicamente para obtenção de 40 corpos de prova, 20 de cada aço. Os corpos de prova utilizados nos ensaios de corrosão foram preparados superficialmente; contudo, o registro disponível não especifica a sequência e a granulometria das lixas nem o procedimento de desengraxe. Essa ausência limita a reprodutibilidade e deve ser considerada na interpretação, sobretudo porque a condição superficial pode influenciar a corrosão inicial.

Para cada condição experimental foram utilizados 20 mL de solução de H_2SO_4 a 1,5; 3,0 ou 4,0% (v/v), com exposição por 90 dias, à temperatura ambiente de 24–27 °C. A concentração de 3,0% foi adotada como condição de referência experimental, enquanto 1,5 e 4,0% representaram condições menos e mais severas. A

concentração exata do ácido de partida e o registro detalhado do cálculo de diluição não constam dos registros disponibilizados; por isso, as concentrações são apresentadas como nominais. O planejamento incluiu três réplicas para cada condição em meio ácido e um corpo de prova por condição de controle em água.

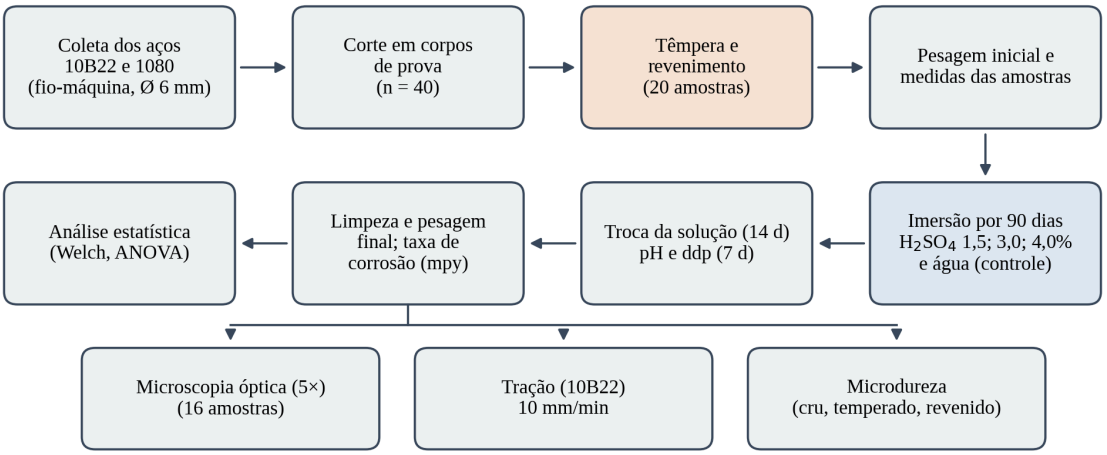
Tabela 2. Delineamento experimental: numeração dos corpos de prova por condição

Aço	Condição	H_2SO_4 1,5%	H_2SO_4 3,0%	H_2SO_4 4,0%	Água
SAE 10B22	Sem tratamento	1 a 3	13 a 15	25 a 27	37
	Têmpera e revenimento	4 a 6	16 a 18	28 a 30	38
SAE 1080	Sem	7 a 9	19 a 21	31 a 33	39

⚠ Esta tabela possui muitas colunas e foi cortada para impressão. Para visualizá-la completa, acesse o artigo original em: https://revistatopicos.com.br/artigos/comportamento-corrosivo-dos-acos-sae-10b22-e-sae-1080-em-meio-sulfurico-efeitos-da-concentracao-acida-e-dos-tratamentos-termicos?noblockage

Fonte: elaboração dos autores a partir dos dados experimentais.

Figura 1. Fluxo das atividades experimentais



Fonte: elaboração dos autores a partir dos dados experimentais.

3.2. Tratamento Térmico

O tratamento térmico foi realizado em 20 corpos de prova (10 de cada aço) no Laboratório de Sistemas Térmicos e Fundição da Universidade Federal de Itajubá, Campus Itabira. Os corpos de prova foram introduzidos em forno pré-aquecido a 500 °C, com permanência registrada de 40 min; em seguida, foram empregadas temperaturas de austenitização de 860 °C para o SAE 10B22 e 790 °C para o SAE 1080. O SAE 10B22 foi temperado em óleo e o SAE 1080 em água. Na sequência, foi realizado revenimento por 2 h a 280 °C para o SAE 10B22 e a 260 °C para o SAE 1080, com resfriamento ao ar. Os corpos de prova destinados à condição sem tratamento permaneceram no estado de recebimento. Amostras adicionais nas condições sem tratamento, temperada e temperada/revenida foram embutidas em baquelite, lixadas e polidas com alumina de 1 µm para microdureza.

Tabela 3. Parâmetros do tratamento térmico

Aço	Austenitização	Meio de têmpera	Revenimento	Resfriamento do revenimento

SAE 10B22	860 °C	Óleo	280 °C por 2 h	Ar
SAE 1080	790 °C	Água	260 °C por 2 h	Ar

Fonte: Autores, 2026

3.3. Ensaio de Corrosão por Imersão

As massas iniciais foram determinadas em balança analítica (Shimadzu ATY224), e o comprimento de cada corpo de prova foi medido com auxílio de barbante devido à curvatura das amostras. As soluções foram preparadas por diluição de ácido sulfúrico concentrado em balão volumétrico; o volume de solução foi de 20 mL por tubo, e as soluções foram renovadas a cada 14 dias. O pH e a diferença de potencial foram registrados semanalmente, e o volume foi restabelecido quando a evaporação o reduzia abaixo do limite operacional. Ao final dos 90 dias, a retirada dos corpos de prova dos meios ácidos, realizou-se a limpeza superficial, tendo como referência a norma ASTM G1-25. Após o período de exposição, os corpos de prova foram submetidos à escovação suave com escova de cerdas não metálicas, visando à remoção dos produtos de corrosão visíveis. Ao término dessa etapa, não foram observadas camadas escuras ou avermelhadas aparentes na superfície dos materiais. A limpeza química complementar após a exposição foi realizada com HCl 0,1 %. Em seguida, os corpos de prova foram secos em estufa a 100 °C por 30 min, resfriados em dessecador até atingirem a temperatura ambiente e pesados para determinação da massa final de cada corpo de prova em balança analítica. Os valores obtidos foram utilizados para calcular a perda de massa durante o ensaio de imersão e, subsequentemente, determinar a taxa de

corrosão dos materiais. A taxa de corrosão foi calculada pela Equação 1 e expressa em mpy, com conversão para mm/ano. A área exposta foi estimada a partir das dimensões medidas; o uso de barbante para medir o comprimento pode contribuir para incerteza na área e, consequentemente, na taxa calculada.

3.4. Caracterização Morfológica, Mecânica e Dureza

A morfologia superficial foi observada em microscópio óptico Optika B500 MET, com ampliação de 5×, utilizando um corpo de prova de cada condição em meio ácido e os corpos de prova individuais dos controles em água. A análise é descritiva e não representa uma quantificação estatística da frequência ou profundidade dos tipos de ataque. O ensaio de tração foi realizado em máquina universal Emic, a 10 mm/min, para os corpos de prova de SAE 10B22 e para amostras de referência sem exposição ao ácido. O SAE 1080 não foi ensaiado porque a dureza do material danificava as garras do equipamento. A microdureza Vickers foi medida em amostras embutidas e polidas, com carga registrada de 100 gf (HV 0,1) e cinco indentações por amostra, utilizando microdurômetro Wilson 402MVD. A ASTM E384-22 é a referência normativa para ensaios de microindentação; a descrição da carga foi normalizada para corresponder ao valor de 100 gf informado nos registros.

3.5. Análise Estatística

Os resultados de taxa de corrosão foram apresentados como média ± desvio padrão (n = 3). Foram reportados o teste t de Welch para comparar amostras sem tratamento e temperadas/revenidas em cada combinação de aço e concentração, ANOVA de um fator para avaliar o efeito da concentração dentro de cada aço e condição, e

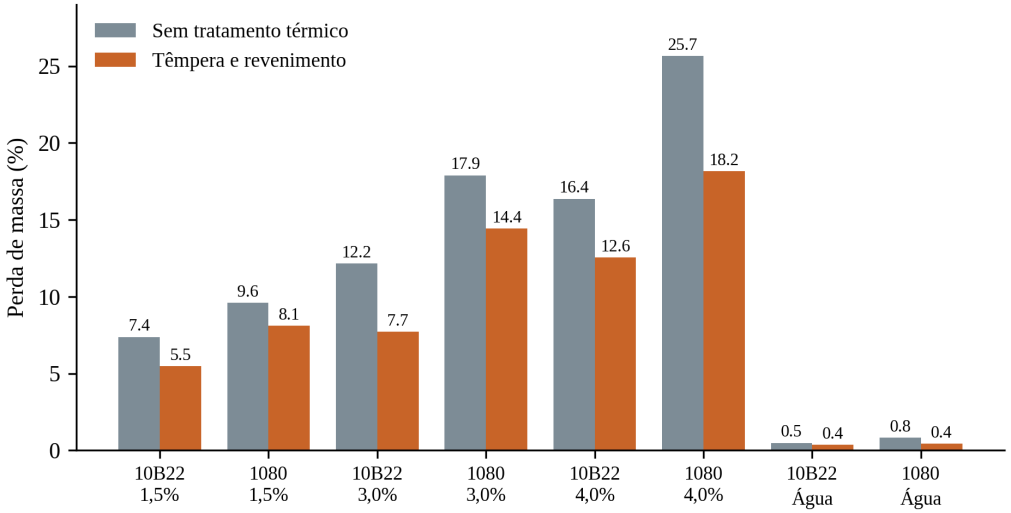
testes de Welch para comparar os aços em cada concentração. Também foram aplicados teste t pareado e Wilcoxon às seis médias de combinações. Essa última análise deve ser interpretada com cautela: as seis médias não são réplicas experimentais independentes de uma população, e os testes sobre médias agregadas não substituem um modelo aplicado aos dados individuais.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Perda de Massa e Taxa de Corrosão

Durante a exposição, observaram-se produtos de corrosão em suspensão, depositados no fundo dos tubos e acumulados nas bordas. A perda de massa percentual aumentou com a concentração de H_2SO_4 e foi, em geral, menor nas amostras tratadas termicamente. A redução percentual da perda de massa variou entre condições; como esse indicador depende da massa inicial e das dimensões do corpo de prova, não deve ser usado isoladamente para comparar a resistência dos dois aços. Para essa comparação, é mais apropriada a taxa de penetração normalizada pela área, reconhecendo-se as incertezas associadas à estimativa geométrica e à limpeza pós-ensaio.

Figura 2. Perda de massa média percentual após 90 dias de imersão



Fonte: elaboração dos autores a partir dos dados experimentais.

A taxa média de corrosão aumentou com a concentração de H_2SO_4 nas quatro séries (dois aços, com e sem tratamento). Para as amostras sem tratamento, o SAE 10B22 passou de 10,87 mpy (0,276 mm/ano) em 1,5% para 18,05 mpy em 3,0% e 24,26 mpy em 4,0%; o SAE 1080 passou de 9,97 para 18,35 e 26,50 mpy, respectivamente. Foi reportado efeito significativo da concentração (ANOVA, $p < 0,001$). A tendência é coerente com a maior agressividade do meio ácido, mas a concentração nominal não é o único fator que controla a taxa: renovação periódica da solução, temperatura, relação volume/área e condição superficial também influenciam o resultado. Os controles em água apresentaram taxas reportadas de 0,45 a 0,88 mpy; como houve apenas um corpo de prova por condição de controle, esses valores são descritivos e não permitem estimar variabilidade ou testar diferenças entre tratamentos.

Tabela 4. Taxa de corrosão (média ± desvio padrão, n = 3) após 90 dias de imersão em H_2SO_4

H_2SO_4	Aço	Sem tratamento, mpy (mm/ano)	Têmpera e revenimento, mpy (mm/ano)	Redução (%)	p

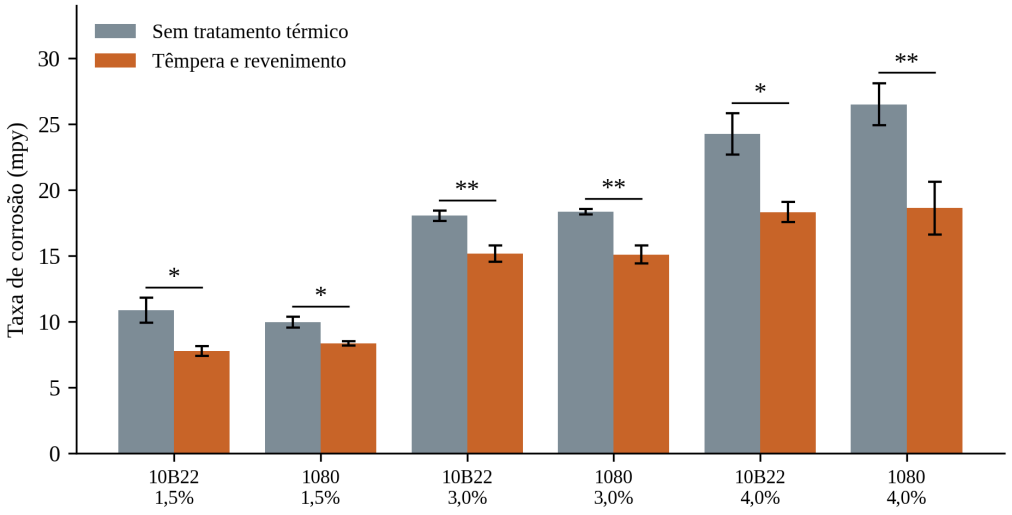
1,5%	10B22	10,87 ± 0,94 (0,276)	7,77 ± 0,38 (0,197)	28,5	0,01
1,5%	1080	9,97 ± 0,41 (0,253)	8,37 ± 0,17 (0,213)	16,0	0,01

⚠ Esta tabela possui muitas colunas e foi cortada para impressão. Para visualizá-la completa, acesse o artigo original em: https://revistatopicos.com.br/artigos/comportamento-corrosivo-dos-acos-sae-10b22-e-sae-1080-em-meio-sulfurico-efeitos-da-concentracao-acida-e-dos-tratamentos-termicos?noblockage

Nota: p: teste t de Welch (sem tratamento versus têmpera e revenimento). Valores entre parênteses em mm/ano.

Fonte: elaboração dos autores a partir dos dados experimentais.

Figura 3. Taxa de corrosão média dos aços 10B22 e 1080 em função da concentração de H_2SO_4 (barras de erro: desvio padrão; *p < 0,05; p < 0,01*



Fonte: elaboração dos autores a partir dos dados experimentais.

A condição temperada e revenida apresentou taxa média inferior à condição sem tratamento em todas as seis combinações de aço e

concentração. As reduções reportadas foram de 15,9 a 29,7%, com valores de p entre 0,005 e 0,018 nas comparações individuais. As maiores reduções absolutas ocorreram em H_2SO_4 a 4,0%: de 24,26 para 18,33 mpy no SAE 10B22 e de 26,50 para 18,62 mpy no SAE 1080. Esses resultados demonstram uma associação entre o ciclo térmico aplicado e a menor taxa gravimétrica observada, mas não isolam o mecanismo responsável. A literatura mostra que a resposta à corrosão após tratamento térmico pode aumentar ou diminuir conforme a composição, as fases formadas, a distribuição de carbonetos e o eletrólito. Prabhu, Jomy e Prabhu (2022), por exemplo, demonstraram em aço EN8 em H_2SO_4 que a taxa depende da microestrutura gerada pelo tratamento, e não apenas da dureza. No presente estudo, a ausência de caracterização microestrutural e as incertezas relativas à condição superficial e à limpeza impedem atribuir causalidade a uma fase específica.

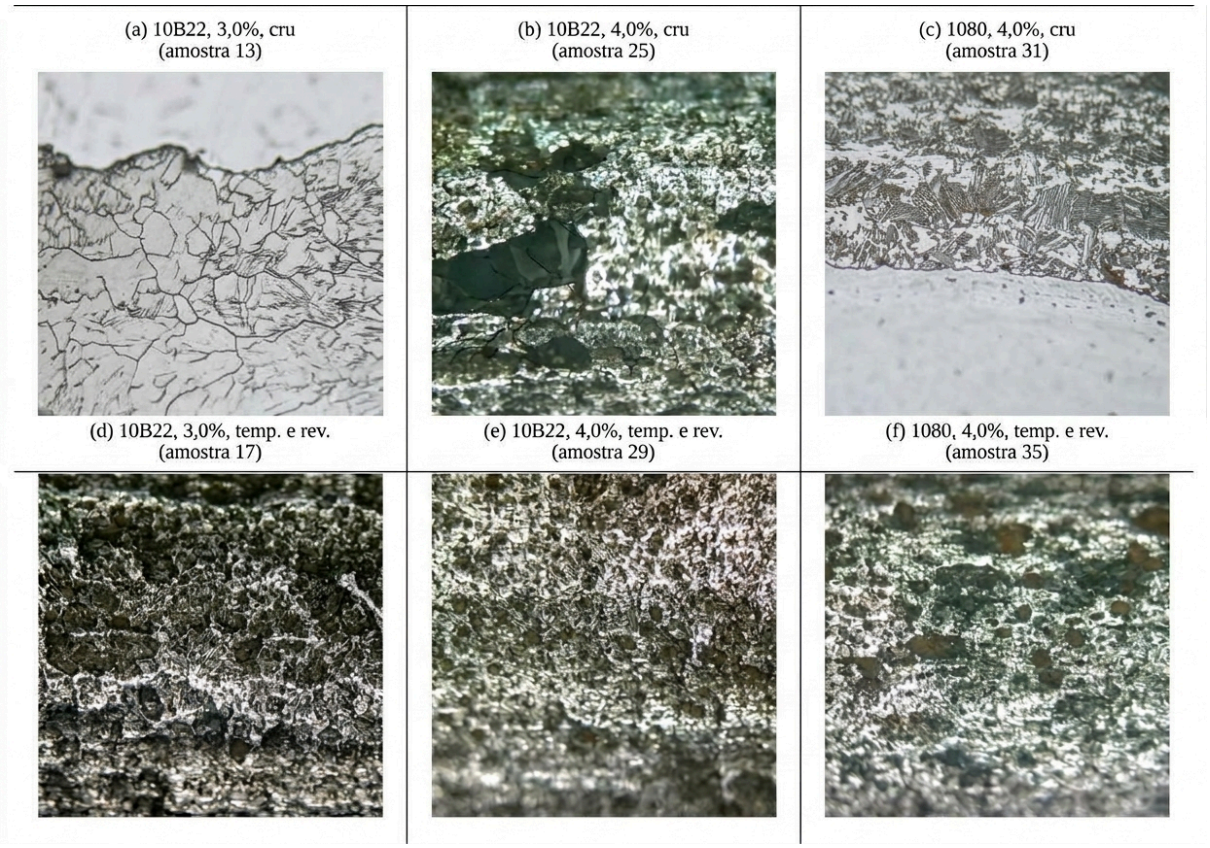
Não foi detectada diferença estatisticamente significativa entre as taxas médias dos dois aços em cada concentração, tanto na condição sem tratamento quanto na condição temperada e revenida (valores de p reportados entre 0,096 e 0,899). Isso não demonstra equivalência entre os materiais; significa apenas que, com o tamanho amostral e a dispersão disponíveis, não foi detectada diferença estatística. Embora o SAE 1080 sem tratamento tenha apresentado taxa numericamente maior em 4,0% (26,50 contra 24,26 mpy), não se deve concluir superioridade de um aço com base apenas nessa diferença numérica. A hipótese de que a concentração do ácido tenha dominado a resposta nas condições ensaiadas é plausível, mas requer confirmação com mais réplicas, caracterização química e microestrutural e análise estatística dos dados individuais.

Os controles em água apresentaram taxas reportadas menores nas amostras tratadas (0,52 mpy para SAE 10B22 e 0,45 mpy para SAE 1080) do que nas amostras sem tratamento (0,71 e 0,88 mpy, respectivamente). Como cada condição contou com apenas um corpo de prova, não é possível atribuir significância estatística a essas diferenças. A limpeza final merece atenção especial: a ASTM G1-25 recomenda remover produtos de corrosão sem remoção significativa do metal-base. Como a concentração e o tempo de contato do HCl diluído não foram registrados, não é possível excluir que a limpeza tenha contribuído para a incerteza da perda de massa.

4.2. Morfologia do Ataque

A inspeção visual e a microscopia óptica indicaram diferenças qualitativas entre as condições. Nas amostras sem tratamento, foram descritas regiões de ataque localizado, em placas e alveolar; nas amostras temperadas e revenidas, a aparência foi descrita como mais distribuída e com cavidades visualmente menores. O SAE 1080 a 1,5% apresentou aparência predominantemente uniforme nas duas condições. Essas observações devem ser interpretadas como descrições das imagens selecionadas, não como evidência quantitativa de mudança no modo de corrosão, pois foi analisado apenas um corpo de prova por condição e a ampliação de 5× não permite medir com confiabilidade a profundidade das cavidades ou identificar microtrincas.

Figura 4. Microscopia óptica (5×) de corpos de prova após 90 dias em H_2SO_4: (a) a (c) sem tratamento; (d) a (f) com têmpera e revenimento



Fonte: elaboração dos autores a partir dos dados experimentais.

A aparência superficial menos localizada nas imagens das amostras tratadas é compatível com a menor taxa gravimétrica média, mas não prova que o tratamento tenha convertido um mecanismo de corrosão em outro. A corrosão localizada pode ser relevante para fixadores por produzir perda de seção concentrada e concentradores de tensão; contudo, a avaliação de profundidade e de eventual trincamento exigiria perfilometria, análise em seção transversal e/ou microscopia eletrônica de varredura. Como essas técnicas não foram empregadas, não se deve inferir ausência de trincas nem afirmar maior segurança em serviço a partir das imagens disponíveis.

4.3. Microdureza e Propriedades de Tração

Os resultados de microdureza evidenciaram comportamentos distintos entre os aços SAE 10B22 e SAE 1080 após os tratamentos térmicos. Para o SAE 10B22, a microdureza aumentou de 171,1 HV, na condição sem tratamento térmico, para 245,0 HV após a têmpera,

correspondendo a um aumento de aproximadamente 43,2%. Após o revenimento, observou-se uma redução para 236,8 HV, indicando um decréscimo de aproximadamente 3,3% em relação à condição temperada. Essa tendência é qualitativamente compatível com o aumento da dureza associado à formação de martensita durante a têmpera, seguido de um amolecimento parcial decorrente das transformações microestruturais promovidas pelo revenimento.

Em contrapartida, o aço SAE 1080 apresentou uma redução da microdureza de 322,4 HV, na condição sem tratamento térmico, para 257,3 HV após a têmpera, seguida de um aumento para 267,6 HV após o revenimento. A redução observada após a têmpera diverge do comportamento convencionalmente esperado para um aço com elevado teor de carbono submetido a condições adequadas de austenitização e resfriamento rápido. Entretanto, os resultados de microdureza, isoladamente, não permitem determinar a causa dessa divergência nem concluir que a têmpera tenha sido ineficaz. Entre os fatores que podem ter contribuído para o comportamento observado, destacam-se possíveis diferenças na condição microestrutural inicial do material, descarbonetação superficial, inadequação dos parâmetros de austenitização, velocidade de resfriamento insuficiente ou não uniforme, preparação inadequada da superfície para o ensaio e variabilidade experimental das medidas. A identificação da causa exige investigações complementares, especialmente a análise metalográfica e a verificação dos parâmetros efetivamente empregados no tratamento térmico.

Quanto às propriedades de tração, os ensaios foram realizados apenas para o aço SAE 10B22, uma vez que a tentativa de ensaio do SAE 1080 foi interrompida devido a danos observados na garra de

fixação do equipamento. Embora o tratamento térmico tenha promovido um aumento expressivo da tensão máxima de tração suportada pelo SAE 10B22, a influência isolada da corrosão sobre essa propriedade não pôde ser quantificada de maneira conclusiva, devido à variação do comprimento útil entre os corpos de prova, decorrente de sua geometria curvilínea. Essa variação compromete a comparação direta dos resultados, uma vez que a geometria e as dimensões do corpo de prova influenciam a distribuição de deformações durante o ensaio.

Tabela 5. Microdureza dos aços nas condições estudadas

Aço	Cru (HV)	Temperado (HV)	Temperado e revenido (HV)
SAE 10B22	171,1	245,0	236,8
SAE 1080	322,4	257,3	267,6

Fonte: elaboração dos autores a partir dos dados experimentais.

Nos ensaios de tração do SAE 10B22, a tensão máxima da amostra de referência sem corrosão passou de 414,9 MPa na condição sem tratamento para 931,4 MPa na condição temperada e revenida, conforme os valores reportados. Nas amostras expostas ao ácido, as médias foram de 398,4 ± 24,4 MPa sem tratamento e 975,8 ± 149,7 MPa com tratamento. A comparação entre corpos de prova corroídos e referências deve ser vista com cautela, porque as referências tiveram n = 1, os corpos de prova eram curvos e o comprimento útil variou entre amostras. A dispersão elevada e a ausência de replicação das referências impedem estimar de forma robusta o efeito isolado da corrosão sobre a resistência à tração. Assim, os dados sustentam uma diferença associada ao tratamento

térmico nas condições testadas, mas não permitem quantificar de forma confiável a perda de resistência mecânica provocada pela exposição ao ácido.

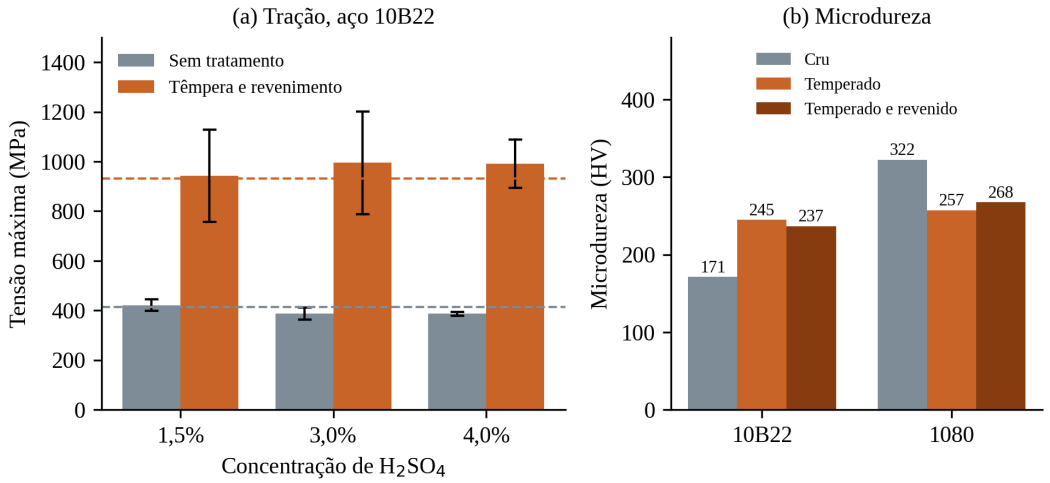
Tabela 6. Tensão máxima de tração do aço 10B22 (média ± desvio padrão, MPa)

Condição	H_2SO_4 1,5%	H_2SO_4 3,0%	H_2SO_4 4,0%	Água	Referê a (se corros
Sem tratamento	421,0 ± 23,0	387,3 ± 25,1	386,9 ± 8,1	435,1	414,1
Têmpera e revenimento	941,9 ± 186,2	994,9 ± 206,9	990,7 ± 97,6	1183,5	931,4

⚠ Esta tabela possui muitas colunas e foi cortada para impressão. Para visualizá-la completa, acesse o artigo original em: https://revistatopicos.com.br/artigos/comportamento-corrosivo-dos-acos-sae-10b22-e-sae-1080-em-meio-sulfurico-efeitos-da-concentracao-acida-e-dos-tratamentos-termicos?noblockage

Nota: n = 3 por concentração; controle em água e referência: n = 1.
Fonte: elaboração dos autores a partir dos dados experimentais.

Figura 5. (A) Tensão máxima de tração do aço 10B22 (linhas tracejadas: referência sem corrosão) e (b) microdureza dos aços 10B22 e 1080



Fonte: elaboração dos autores a partir dos dados experimentais.

4.4. Limitações e Perspectivas

A interpretação dos resultados é limitada por fatores metodológicos que devem ser considerados na avaliação do alcance das conclusões. O número de réplicas em meio ácido foi de três por condição, enquanto os controles em água e as referências mecânicas sem corrosão não tiveram replicação suficiente para inferência estatística. A área exposta foi estimada com auxílio de barbante para medir o comprimento dos corpos de prova curvos, procedimento que pode introduzir incerteza geométrica.

As concentrações de H_2SO_4 utilizadas devem ser tratadas como condições experimentais de severidade crescente, e não como simulação direta de chuva ácida ou de um ambiente de serviço específico. A ASTM G31 ressalta que ensaios acelerados de corrosão podem fornecer resultados indicativos e que a resposta depende de múltiplas variáveis do ensaio. Estudos futuros devem padronizar a preparação superficial e a limpeza, aumentar o número de réplicas, determinar a composição química dos lotes e incluir metalografia, microscopia eletrônica, difração de raios X e técnicas eletroquímicas.

Como continuidade, recomenda-se: (i) documentar integralmente a preparação superficial, a composição e a renovação das soluções e a limpeza pós-ensaio; (ii) repetir os ensaios com maior número de corpos de prova e controles replicados; (iii) Empregar modelo estatístico compatível com os fatores aço, concentração e tratamento; (iv) caracterizar a microestrutura e a eventual descarbonetação antes e depois dos tratamentos; (v) quantificar a profundidade do ataque localizado; e (vi) combinar perda de massa com polarização potenciodinâmica e espectroscopia de impedância. Para aplicações em fixadores, ensaios específicos de propriedades mecânicas e fragilização por hidrogênio também seriam necessários antes de extrapolar os resultados para condições de serviço.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados obtidos para os aços SAE 10B22 e SAE 1080 após 90 dias de imersão em soluções de H_2SO_4, nas concentrações de 1,5%, 3,0% e 4,0% (v/v), foram estabelecidas as seguintes conclusões:

i. Para as amostras sem tratamento térmico, observou-se um aumento da taxa média de corrosão com o incremento da concentração de H_2SO_4. No aço SAE 10B22, a taxa aumentou de 10,87 para 24,26 mpy, enquanto, no SAE 1080, passou de 9,97 para 26,50 mpy, entre as concentrações de 1,5% e 4,0%. A análise de variância (ANOVA) indicou efeito estatisticamente significativo da concentração sobre a taxa de corrosão ($p < 0,001$).

ii. A condição temperada e revenida apresentou taxas médias de corrosão entre 15,9% e 29,7% inferiores às observadas na

condição sem tratamento térmico, considerando as seis combinações de aço e concentração avaliadas. As reduções percentuais das taxas médias de corrosão nas condições temperada e revenida, em comparação com a condição sem tratamento térmico, foram calculadas com base nas médias obtidas para cada aço e concentração de ácido sulfúrico. Esses percentuais representam diferenças relativas entre as médias observadas, não devendo ser interpretados, isoladamente, como medidas de significância estatística ou como evidência definitiva de um efeito causal do tratamento térmico. Entretanto, a atribuição dessas diferenças exclusivamente às alterações microestruturais decorrentes do tratamento térmico deve ser feita com cautela, em razão da ausência de caracterização microestrutural e das limitações no registro dos procedimentos de preparação e limpeza dos corpos de prova.

iii. Não foi detectada diferença estatisticamente significativa entre os aços SAE 10B22 e SAE 1080 nas concentrações avaliadas. Esse resultado indica que não foram encontradas evidências estatísticas suficientes para afirmar uma diferença entre suas taxas de corrosão nas condições estudadas. Contudo, a ausência de significância estatística não demonstra equivalência entre os materiais nem permite estabelecer a superioridade de um deles quanto à resistência à corrosão.

iv. Os resultados de microdureza apresentaram tendências distintas entre os materiais. O aço SAE 10B22 apresentou aumento da dureza após a têmpera, seguido de uma pequena redução após o revenimento. Em contrapartida, o SAE 1080 apresentou redução da dureza após a têmpera e um pequeno

aumento após o revenimento. Esse comportamento divergente evidencia a necessidade de investigações complementares, incluindo a caracterização metalográfica e a verificação dos parâmetros de tratamento térmico, uma vez que os valores de microdureza, isoladamente, não permitem identificar as fases presentes nem determinar a causa das variações observadas.

v. Os resultados dos ensaios de tração do aço SAE 10B22 indicaram diferenças entre as condições térmicas avaliadas. Entretanto, as limitações associadas à baixa replicação das condições de referência e à variabilidade geométrica dos corpos de prova impedem quantificar de maneira robusta a contribuição isolada da corrosão sobre a resistência à tração. Dessa forma, os resultados devem ser interpretados considerando as restrições metodológicas do ensaio.

Em conjunto, os resultados indicam que, nas condições experimentais investigadas, a condição temperada e revenida esteve associada a menores taxas gravimétricas de corrosão para ambos os aços. Embora essa tendência sugira uma possível influência do tratamento térmico sobre o comportamento corrosivo dos materiais, a confirmação dos mecanismos envolvidos requer ensaios com replicação adequada, maior controle das etapas de preparação e limpeza dos corpos de prova e caracterização microestrutural complementar. Adicionalmente, estudos eletroquímicos podem contribuir para esclarecer os mecanismos de corrosão e ampliar a compreensão da influência das condições metalúrgicas sobre a resistência dos aços em meios contendo ácido sulfúrico. A extrapolação dos resultados para aplicações industriais deve,

portanto, considerar as limitações do procedimento experimental e a necessidade de validação em condições representativas de serviço.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALENEZI, I. **Effects of heat treatment on the corrosion behavior of ASTM A-36 steel.** Engineering, Technology & Applied Science Research, v. 10, n. 1, p. 5320-5324, 2020. DOI: 10.48084/etasr.3326.

ARCELORMITTAL. **Guia do aço.** 2013. Disponível em: http://brasil.arcelormittal.com.br/pdf/quem-somos/guia-aco.pdf. Acesso em: 5 maio 2018.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM E384-22: Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials. West Conshohocken: ASTM International, 2022.** DOI: 10.1520/E0384-22. Disponível em: https://store.astm.org/e0384-22.html. Acesso em: 26 out. 2026.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM G1-25: Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens. West Conshohocken: ASTM International, 2025.** DOI: 10.1520/G0001-25. Disponível em: https://store.astm.org/standards/g1. Acesso em: 26 out. 2026.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM G31-21(2025): **Standard Guide for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals.** West Conshohocken: ASTM International, 2025. Disponível em: https://store.astm.org/standards/g31. Acesso em: 26 out. 2026.

CALLISTER, W. D. **Ciência e engenharia de materiais:** uma introdução. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

CASARIN, S. J. **Caracterização da temperabilidade de um aço C-Mn microligado ao boro, através de dilatometria e curvas de transformações de fases por resfriamento contínuo.** 1996. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.

CHEN, K.-J.; HUNG, F.-Y.; LUI, T.-S.; TSENG, C.-H. **Decrease in hydrogen embrittlement susceptibility of 10B21 screws by bake aging.** Metals, v. 6, n. 9, art. 211, 2016. DOI: 10.3390/met6090211.

CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos.** 7. ed. ampl. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, 2012.

ESCRIVÀ-CERDÁN, C. et al. **Effect of tempering heat treatment on the CO2 corrosion resistance of quench-hardened Cr-Mo low-alloy steels for oil and gas applications.** Corrosion Science, v. 154, p. 36-48, 2019. DOI: 10.1016/j.corsci.2019.03.036.

GEMELLI, E. **Corrosão de materiais metálicos e sua caracterização.** Rio de Janeiro: LTC, 2001.

GENTIL, V. **Corrosão.** 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2022.

GONÇALVES, F. V. **Influência da temperatura de revenido na fragilização por hidrogênio no aço ABNT 10B22 modificado.** 2013. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

HWANG, B.; SUH, D. W.; KIM, S. J. **Austenitizing temperature and hardenability of low-carbon boron steels.** Scripta Materialia, v. 64, p. 1118-1120, 2011. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2011.03.003.

IBRAHIM, H. I.; KARASH, E. T.; SULTAN, J. N.; SHAREEF, Z. Q. **Investigation of the corrosion of heating treatment medium carbon steel in sulfur aqueous solution.** Revue des Composites et des Matériaux Avancés, v. 34, n. 3, p. 277-286, 2024. DOI: 10.18280/rcma.340302.

NACE INTERNATIONAL. **International measures of prevention, application, and economics of corrosion technologies study.** Houston: NACE International, 2016. Disponível em: https://www.zerust.com/wp-content/uploads/2018/10/Nace-International-Report.pdf.

PANNONI, F. D. **Princípios da proteção de estruturas metálicas em situação de corrosão e incêndio.** Ouro Branco: Coletânea do Uso do Aço, 2007.

PRABHU, D.; JOMY, J.; PRABHU, P. R**. Influence of different heat treatment temperatures on the microstructure and corrosion behaviour of dual-phase EN8 steel in 0.5 M sulphuric acid solution. Journal of Bio- and Tribo-Corrosion,** v. 8, art. 88, 2022. DOI: 10.1007/s40735-022-00689-7. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s40735-022-00689-7.

WOJTACHA, A.; KCIUK, M.; OPIELA, M. **Effect of heat treatment conditions on corrosion resistance of 0.28C-1.4Mn-0.3Si-0.26Cr steel with Nb, Ti, and V microadditions.** Materials, v. 14, n. 12, art. 3254, 2021. DOI: 10.3390/ma14123254.

YAMANAKA, K. et al. **Surface evolution and corrosion behaviour of Cu-doped carbide-reinforced martensitic steels in a sulfuric acid solution.** npj Materials Degradation, v. 5, 2021. DOI: 10.1038/s41529-021-00187-0.

[1] Doutora, Universidade do Estado de Minas Gerais, UEMG, Unidade João Monlevade, Brasil. E-mail: acesse o artigo original para visualizar o e-mail. Lattes: https://lattes.cnpq.br/5291025103333454. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6342-3946

[2] Engenheiro Metalurgista pela Universidade do Estado de Minas Gerais, UEMG, Unidade João Monlevade, Brasil. E-mail: acesse o artigo original para visualizar o e-mail

[3] Engenheiro Metalurgista pela Universidade do Estado de Minas Gerais, UEMG, Unidade João Monlevade, Brasil. E-mail: acesse o artigo original para visualizar o e-mail

[4] Mestre, Professor e Pesquisador - Universidade do Estado de Minas Gerais, UEMG, Unidade João Monlevade, Brasil. E-mail: acesse o artigo original para visualizar o e-mail. Lattes: http://lattes.cnpq.br/4322003351025088. ORCID: https://orcid.org/0009-0003-2390-6542