

EFEITO DA TEMPERATURA DE SOLUBILIZAÇÃO NA RESISTÊNCIA À CORROSÃO DO AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX SINTERIZADO

^{1*}Albuquerque, C. M. A., ²Araújo, W.S., ¹de Lima, H. M. L. F.

¹ Universidade Federal do Cariri - Engenharia de Materiais, Av. Tenente Raimundo Rocha, 1639, Cidade Universitária, Juazeiro do Norte, Ceará, Brasil.

² Universidade Federal do Ceará – Departamento de Engenharia Metalúrgica e Materiais, Av. Mister Hull, s/n, Pici Fortaleza, Ceará, Brasil

*Autor correspondente: cris.albuquerque@aluno.ufca.edu.br

RESUMO

A corrosão é um processo natural que afeta os metais, sendo a corrosão por pite uma forma localizada comum em aços inoxidáveis, ocorrendo devido a falhas na camada protetora da superfície, prejudicando a aplicação dos materiais em ambientes com alta concentração de íons cloreto. Para enfrentar este problema, os aços inoxidáveis duplex (AID), conhecidos por sua alta resistência à corrosão e boa resistência mecânica, são frequentemente utilizados. Esses aços têm uma microestrutura bifásica composta de austenita e ferrita e podem ser produzidos, por exemplo, via metalurgia do pó, uma técnica que melhora o aproveitamento da matéria-prima e reduz custos. Tratamentos térmicos, como a solubilização, são aplicados para eliminar precipitados e melhorar a microestrutura. Este estudo investigou o efeito da temperatura de solubilização (1000 °C, 1100 °C e 1200 °C) na resistência à corrosão do aço inoxidável duplex 2205 em diferentes concentrações de cloreto. Os resultados mostraram que o aumento da temperatura de solubilização não prejudicou o comportamento eletroquímico do aço em 0,6 mol/L de NaCl. Adicionalmente, o aumento da concentração de íons cloreto na solução contendo 1,0 mol/L de NaCl, não prejudicou a resistência à corrosão das amostras solubilizadas a 1000°C e 1100°C.

Palavras-chave: Metalurgia do pó, Corrosão, Tratamento térmico.

INTRODUÇÃO

Os aços inoxidáveis são ligas metálicas de grande importância industrial devido à sua resistência à corrosão e propriedades mecânicas adaptáveis, o que se deve em grande parte à presença de elementos de liga como cromo e níquel. Estas ligas contêm entre 11% e 30% de cromo e até 30% de níquel, sendo que a composição mais comum envolve 18% de cromo e 8% de níquel. O cromo, ao reagir com o oxigênio, forma uma camada de óxido de cromo na superfície do aço, conhecida como camada passivadora, que proporciona uma barreira eficaz contra a corrosão. Essa camada é auto reparadora, regenerando-se espontaneamente quando exposta novamente ao ar (Moura, 2019).

Os aços inoxidáveis são classificados com base em sua microestrutura metalúrgica, resultando em cinco principais tipos: ferríticos, martensíticos, austeníticos, duplex e endurecidos por precipitação (Costa e Silva, 2006). Cada um desses tipos possui características específicas que determinam sua aplicabilidade em diferentes contextos industriais. Por exemplo, os aços ferríticos, com baixo teor de carbono e alto teor de cromo, oferecem boa resistência à corrosão e soldabilidade, mas não são adequados para tratamentos térmicos de endurecimento (Di Schino, 2020). Em contraste, os aços martensíticos são temperáveis, apresentando elevadas propriedades mecânicas, enquanto os aços austeníticos, devido à sua estrutura essencialmente austenítica, combinam alta resistência à corrosão com excelente tenacidade em baixas temperaturas (Lai, Shek, Lo, 2012).

Dentre os aços inoxidáveis, os duplex destacam-se por sua microestrutura bifásica, composta por austenita e ferrita, que confere uma combinação de alta resistência mecânica e superior resistência à corrosão em relação aos aços austeníticos (He et al., 2024). Essa característica, juntamente com sua alta tenacidade e resistência ao escoamento, torna os aços duplex uma escolha preferida em aplicações que requerem desempenho elevado sob condições agressivas, como na indústria de celulose e papel (Lopes et al., 2022).

Além das propriedades intrínsecas das ligas, os tratamentos térmicos desempenham um papel crucial na modificação e otimização das características dos aços inoxidáveis. Esses tratamentos envolvem aquecimento e resfriamento controlados para ajustar a microestrutura e, conseqüentemente, as propriedades mecânicas e de resistência à corrosão do material. Contudo, o controle rigoroso desses processos é essencial, especialmente para evitar a precipitação de fases

secundárias indesejáveis que podem comprometer a performance do material (CALLISTER, 2012).

Neste contexto, este trabalho investiga o efeito da temperatura de solubilização no comportamento eletroquímico do aço inoxidável duplex 2205 em meios contendo 0,6 mol/L e 1 mol/L de NaCl por meio da técnica de polarização potenciodinâmica. Para esta análise, foi realizado o tratamento de solubilização a 1000 °C, 1100 °C e 1200 °C durante 30 minutos.

METODOLOGIA

Neste trabalho, foi utilizado um aço inoxidável duplex 2205 fabricado via metalurgia do pó. A composição química obtida por espectrometria de emissão óptica é apresentada na tabela 1.

Tabela 1 - Composição química do AID 2205 estudado em %p.

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Pb	Al	Nb	V	Fe
0,04	0,79	1,49	0,02	0,00	6,07	20,5	3,10	0,10	0,18	0,18	0,01	0,11	Bal
				7		3					4		

Fonte: próprio autor.

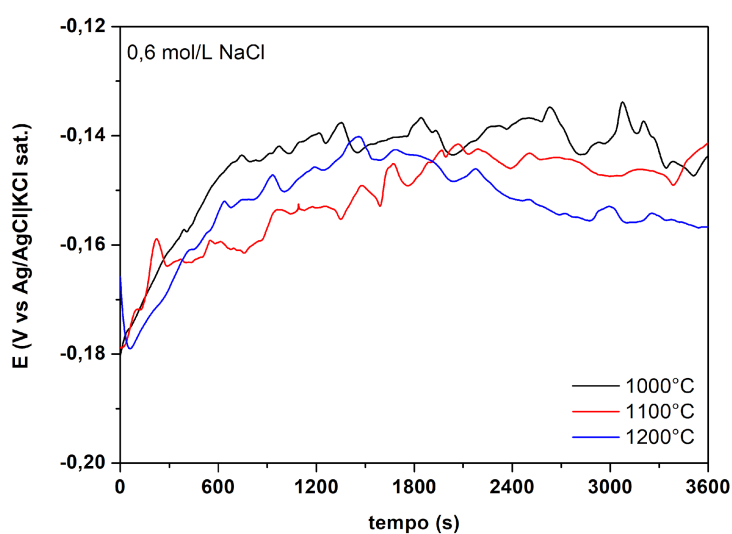
Inicialmente, as amostras foram submetidas a tratamentos térmicos de solubilização a 1000°C, 1100°C e 1200°C por 30 minutos. Ao final dos tratamentos térmicos as peças foram resfriadas em água. Após a solubilização, foram produzidos os eletrodos de trabalho.

O comportamento eletroquímico foi estudado em duas soluções de trabalho diferentes, uma contendo 0,6 mol/L e outra contendo 1 mol/L de NaCl a temperatura ambiente, por meio da técnica de polarização potenciodinâmica. Uma célula eletroquímica de três eletrodos foi utilizada para as medidas composta pelo eletrodo de trabalho (ET) (amostras solubilizadas), eletrodo de referência (ER) Ag/AgCl/KCl saturado e um eletrodo auxiliar (EA) de platina imersos na solução de trabalho. Antes das medidas, as amostras de trabalho foram lixadas com lixas d'água de 100, 200, 320, 400 e 600 *mesh*. A polarização foi iniciada após 60 minutos de monitoramento do potencial de circuito aberto. Para cada condição estudada foram repetidos os ensaios em triplicata e observou-se a reprodutibilidade dos comportamentos obtidos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

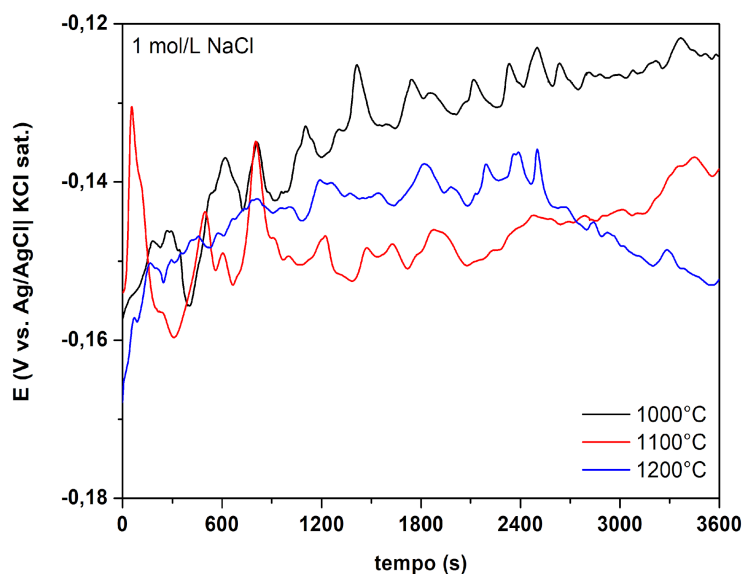
As Figuras 1 e 2 mostram o comportamento durante o ensaio de monitoramento do potencial de circuito aberto das amostras com tratamento térmico de solubilização a 1000°C, 1100°C e 1200°C por 30 minutos, em meio de NaCl 0,6 mol/L e 1,0 mol/L, respectivamente.

Figura 1 – Curvas de potencial de circuito aberto em meio de NaCl 0,6 mol/L de amostras solubilizadas em 1000°C, 1100°C e 1200°C.



Fonte: Próprio autor

Figura 2 - Curvas de potencial de circuito aberto em meio de NaCl 1,0 mol/L de amostras solubilizadas em 1000°C, 1100°C e 1200°C.



Fonte: Próprio autor

Pode-se observar, na Figura 1, uma tendência comum entre as amostras solubilizadas a 1000°C e 1100°C: um potencial mais negativo no início da imersão na solução de trabalho seguido por um aumento dos valores de potenciais até sua estabilização por volta de 2400 s. Esse comportamento indica uma redução da atividade eletroquímica na superfície das amostras com o aumento do tempo de imersão, o que pode ser associado à formação do filme passivo nessas ligas. Para a amostra solubilizada a 1200°C, o aumento dos valores de potencial é observado até cerca de 1500 s, em seguida há uma redução nos valores de potencial que pode indicar um efeito negativo da solubilização nesta temperatura.

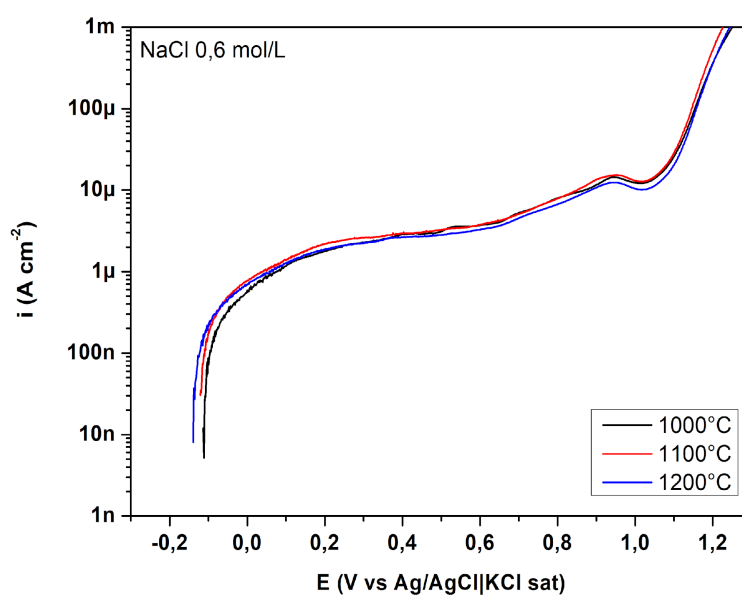
A figura 2 mostra os resultados para a solução contendo 1 mol/L de NaCl. Com o aumento da concentração de íons cloreto na solução de trabalho, pode-se observar uma intensa oscilação nos valores medidos para as amostras solubilizadas entre 1000°C e 1100°C e um aumento desses valores com o aumento do tempo de imersão na solução de trabalho. Os valores mais nobres, entretanto, são observados para a amostra solubilizada a 1000°C. Já a amostra solubilizada a 1200°C apresenta um comportamento distinto das demais e semelhante ao observado na solução contendo 0,6 mol/L de NaCl: um aumento nos valores medidos de potencial até

cerca de 2400 s de imersão, seguido por uma redução nesses valores. Sugerindo mais uma vez o efeito prejudicial da solubilização a 1200°C para este aço.

Adicionalmente, comparando os resultados entre as diferentes soluções de trabalho, observa-se que o aumento da concentração de cloreto não causou grandes alterações nos valores de potenciais medidos.

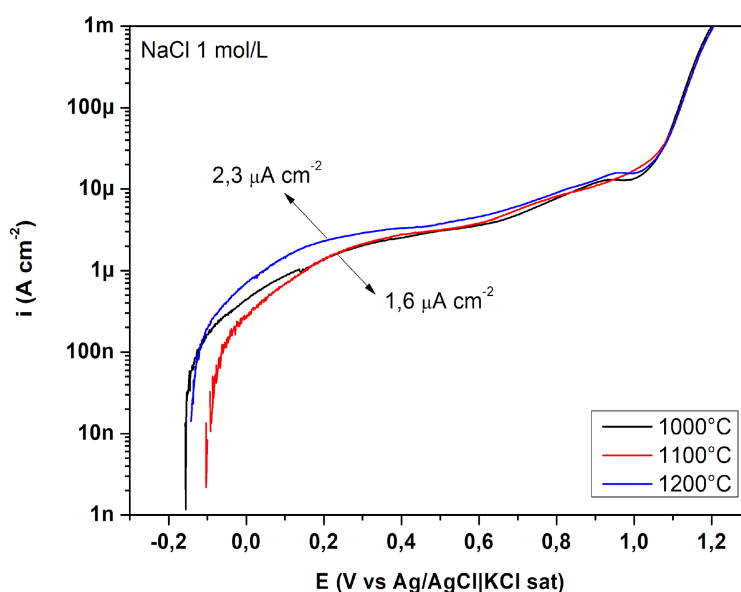
As Figuras 3 e 4 mostram o comportamento das amostras solubilizadas no ensaio de polarização.

Figura 3 – Curvas de polarização linear em meio de NaCl 0,6 mol/L de amostras solubilizadas em 1000°C, 1100°C e 1200°C.



Fonte: Próprio autor

Figura 4 - Curvas de polarização linear em meio de NaCl 1,0 mol/L de amostras solubilizadas em 1000°C, 1100°C e 1200°C.



Fonte: Próprio autor

As figuras mostram que as amostras apresentam comportamento semelhante: uma ampla faixa passivação que se inicia por volta de 0,1 V, e um aumento brusco de corrente em potenciais elevados, por volta de 1,0 V, caracterizando a evolução de oxigênio na superfície das amostras, provocando a quebra do filme passivo. Comparando os resultados obtidos nas temperaturas estudadas em meio contendo 0,6 mol/L de NaCl (Fig. 3), observa-se um deslocamento das curvas para valores de potenciais mais negativos com o aumento da temperatura de solubilização. Apesar disso, com o aumento do potencial de varredura, as curvas apresentam comportamento semelhante na região passiva. O aumento da temperatura, portanto, não prejudicou a resistência à corrosão do AID 2205 em 0,6 mol/L de NaCl.

Os resultados da polarização realizada em meio de 1,0 mol/L de NaCl mostraram uma divergência maior entre as curvas obtidas, que mantiveram o seu potencial de quebra de passivação por volta de 1,0V. Nesta solução, as curvas referentes às amostras solubilizadas a 1000°C e 1200°C apresentaram-se deslocadas para potenciais mais negativos em relação à amostra solubilizada a 1100°C. Adicionalmente, a amostra solubilizada a 1200°C é a que possui os valores

de densidade de corrente na região crítica mais elevados, o que pode sugerir um efeito negativo da solubilização nesta temperatura no início da passivação da liga.

Comparando os resultados entre as duas soluções de trabalho, observa-se pouca diferença entre as curvas obtidas para as amostras solubilizadas a 1000°C e 1100°C, o que indica que o aumento da concentração de íons cloreto não afetou a resistência à corrosão do material nestas condições.

CONCLUSÃO

- O aumento da temperatura de solubilização não afetou o comportamento eletroquímico do aço 2205 em 0,6 mol/L de NaCl;
- A solubilização a 1200°C prejudicou o início da passivação do aço em 1 mol/L de NaCl;
- O aumento da concentração de íons cloreto não prejudicou a resistência à corrosão das amostras solubilizadas a 1000°C e 1100°C.

REFERÊNCIAS

CALLISTER, W. D. Jr. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

DI SCHINO, A. **Manufacturing and Applications of Stainless Steels**. Metals, v. 10, n. 3, p. 327, 1 mar. 2020.

HE, H. et al. **A stochastic study of the effect of the phase ratio on the corrosion resistance of duplex stainless steel**. Materials letters, v. 360, p. 136003–136003, 1 abr. 2024.

LAI, J. K. L.; SHEK, C. H.; LO, K. H. **Stainless Steels: An Introduction and Their Recent Developments**. [s.l.] Bentham Science Publishers, 2012.

LIU, C. et al. **Effect of Solution Treatment Temperature on Microstructure, Mechanical Properties, and Corrosion Resistance of 5A Super Duplex Stainless Steel**. Journal of materials engineering and performance, v. 32, n. 15, p. 6622–6629, 31 out. 2022.

LOPES, M. et al. **Corrosion Resistance of Cast Duplex Stainless Steels Grades ASTM A890 1B and 3A in Electrolytes Containing Chloride, Carbon Dioxide and Thiosulfate**. Journal of materials engineering and performance, v. 32, n. 13, p. 5980–5997, 20 out. 2022.

MOURA, M. J. D. S. **Estudo do efeito da precipitação da fase sigma na resistência à corrosão do aço duplex sinterizado**. Acesso em: 9 jun. 2024.

SILVA, André Luiz da Costa. **Aços e ligas especiais**. 4. ed. São Paulo: Blucher, 2021. Acesso em: 8 jun. 2024.