

Análise da influência das condições de envelhecimento na resistência mecânica e à corrosão do aço UNS S31803

Cássia Barbosa Gomes¹
Elaine Carballo Siqueira Corrêa¹
Renata Braga Soares²
Ricardo Adriano Dorledo de Faria²
Vanessa Freitas de Cunha Lins²
Wellington Lopes^{1*} 

Resumo

A presença da fase sigma (σ) nos aços inoxidáveis duplex pode fragilizar esses materiais além de reduzir a resistência à corrosão. Considerando esta abordagem, este trabalho investigou os efeitos das condições do tratamento térmico de envelhecimento na resistência mecânica e à corrosão do aço inoxidável duplex UNS S31803. A avaliação da evolução microestrutural foi feita por meio de microscopia óptica e eletrônica de varredura, as propriedades mecânicas a partir de ensaios de tração, flexão e microdureza Vickers enquanto o estudo da corrosão por meio dos ensaios de polarização potenciodinâmica. A precipitação da fase sigma ocorreu para as duas temperaturas de envelhecimento, 800 °C e 900 °C, e dois tempos de encharque, 20 e 60 minutos. A resistência mecânica aumentou em relação ao estado solubilizado para os dois modos de caracterização (tração e flexão), mas a ductilidade variou em função do modo de caracterização. A menor resistência à corrosão ocorreu para o envelhecimento realizado a 800 °C durante 60 minutos.

Palavras-chave: Aço inoxidável duplex; Fase Sigma; Resistência à Corrosão.

Analysis of the influence of aging conditions on the mechanical strength and corrosion of UNS S31803 steel

Abstract

The presence of the sigma (σ) phase in duplex stainless steels can result in a brittle fracture and the reducing corrosion resistance of these materials. Considering this approach, this work investigated the effects of aging heat treatment conditions on the mechanical and corrosion resistance of UNS S31803 duplex stainless steel. The evaluation of the microstructural evolution was made by optical and scanning electron microscopy, the mechanical properties were investigated by Vickers microhardness, tensile and flexural tests and the study of corrosion by potentiodynamic polarization tests. The sigma phase was observed for the two aging temperatures, 800 °C and 900 °C, and soaking times, 20 and 60 minutes. The mechanical strength increased concerning to the solubilized state, for the two characterization modes (tensile and flexural), but the ductility varied depending on the characterization mode. The lowest corrosion resistance occurred for aging carried out at 800 °C for 60 minutes.

Keywords: Duplex Stainless Steel, Sigma Phase, Corrosion Resistance.

1 Introdução

Os aços inoxidáveis duplex são muito utilizados em indústrias de ambiente agressivo devido à associação de alta resistência mecânica e à corrosão, sendo tais características decorrentes à presença de uma microestrutura bifásica composta por uma fração balanceada de ferrita (α) e de austenita (γ),

adquirida a partir da realização do tratamento térmico de solubilização e também pela adição de elementos de liga como o cromo, molibdênio, níquel e nitrogênio. Contudo, quando esses aços são aquecidos na faixa de temperatura de 300 °C a 1050 °C podem ocorrer alterações metalúrgicas

¹Departamento de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG, Belo Horizonte, MG, Brasil.

²Departamento de Química, Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil.

*Autor correspondente: wellington.demat@gmail.com; wellingtonlopes@cefetmg.br



importantes que comprometem as propriedades mecânicas, além da resistência à corrosão [1].

A principal fase formada com a rápida difusão é a fase sigma (σ), mas também podem ser formadas outras fases como a fase chi (χ) e a austenita secundária (γ_2). A fase χ , por exemplo, é rica em molibdênio, sendo formada normalmente entre 700 °C e 900 °C e assim como a fase σ , também fragiliza os aços inoxidáveis duplex, além de se decompor rapidamente, originando a fase sigma [2,3].

A fase σ é a fase responsável pelos maiores danos a um aço inoxidável duplex, devido à fragilidade ocasionada pela precipitação de uma quantidade tipicamente maior que 3% que contribui para a redução da quantidade de ferrita durante o seu período de formação, além de favorecer o ataque corrosivo pela formação de pites [2].

Considerando isso, neste trabalho foi investigado o efeito do tempo de envelhecimento na resistência mecânica e à corrosão do aço inoxidável UNS S31803 com a utilização dos ensaios de tração, de flexão e de polarização potenciodinâmica, respectivamente, com a contribuição da análise estatística para melhor definir os efeitos de cada uma das variáveis investigadas.

2 Material e métodos

2.1 Tratamentos térmicos e caracterização microestrutural

Para realização deste trabalho foi utilizado o aço inoxidável duplex UNS S31803, na forma de chapa com espessura de 1,8 mm com a seguinte composição química nominal (teor em massa): 0,03% de Carbono (máx. 0,03%), 23,00% de Cromo (21% a 23%), 5,03% de Níquel (4,4% a 6,5%), 3,06% de Molibdênio (2,5% a 3,5%) e 0,03% de Fósforo (máx. 0,03). Tais resultados de composição química estão adequados à utilização do material, conforme descrição do próprio fabricante e referencial de outros pesquisadores [4].

Os tratamentos térmicos de solubilização e de envelhecimento foram realizados em um forno mufla Analógica AN1222. A solubilização foi realizada a 1050 °C durante 5 minutos com posterior resfriamento em água a 11 °C. Já o envelhecimento ocorreu em duas temperaturas: 800 °C e 900 °C, com tempos de encharque de 20 minutos e de 60 minutos seguido por resfriamento ao ar.

A caracterização microestrutural do aço UNS S31803 foi realizada a partir do embutimento a frio com uso de acrílico autopolimerizável em amostras quadradas de lado 10 mm e espessura de 1,8 mm. Em seguida foram feitos o lixamento e o polimento mecânicos, utilizando lixas de 120, 240, 400 e 600 mesh, acompanhado por polimento com uso de pasta de diamante de granulometria de 9 μm e 3 μm com posterior ataque com uso do reativo químico Behara modificado. As imagens foram observadas em um

microscópio óptico (MO) Fortel, modelo IM713 com sistema de digitalização de imagens Kontrol. Essas amostras também foram usadas para as análises em microscopia eletrônica de varredura (MEV) com imagens obtidas a partir de elétrons secundários, tensão de 15 kV e distância de trabalho de 17 mm em um microscópio eletrônico de varredura Shimadzu modelo SSX-550.

A quantificação das fases ferrita e austenita do aço UNS 31803 nos estados como recebido (laminado a frio) e solubilizado foi feita em 10 fotomicrografias com a mesma ampliação obtidas a partir de microscopia óptica por meio da identificação da fração em área das partes clara (austenita) e escura (ferrita) com uso do software livre Image J. Já a quantificação da fase sigma foi feita com uso do método de contagem por pontos mediante a sobreposição de uma grade com um número total de 192 pontos em 10 imagens com a mesma ampliação e geradas por MO com a utilização do mesmo software Image J. Neste caso, a identificação do percentual da fase sigma obedeceu a norma ASTM E652 [5].

2.2 Caracterização mecânica

O ensaio de microdureza Vickers (HV) foi feito com uso de um microdurômetro HMV Shimadzu modelo 2T, com penetrador Vickers, com carga de 200 gf e tempo de aplicação de 15 segundos.

Os ensaios de tração foram conduzidos em uma máquina universal de ensaios Instron 5982 com sistema de aquisição de dados Blue Hill 3, extensômetro mecânico do tipo agulhas, com taxa de deformação inicial igual a 10^{-3} s^{-1} e com a utilização de corpos de prova com seção transversal retangular, com comprimento útil de 75 mm, largura útil de 12,5 mm e espessura de 1,8 mm [6].

O ensaio de flexão foi realizado usando-se uma máquina universal de ensaios Shimadzu AGX com célula de carga de 1 kN com uso de amostras com dimensão de 100 mm x 15 mm x 1,8 mm (comprimento x largura x espessura), com taxa de deformação inicial igual a 10^{-3} s^{-1} e distância entre os apoios de 80 mm [7]. Deve-se ressaltar que todos os ensaios foram realizados até a perda de contato das amostras com os apoios usados nos experimentos.

Com o objetivo de investigar se os valores de dureza Vickers variaram de modo significativo em função das condições de tratamento térmico foi feito o estudo estatístico dos dados com o estabelecimento do teste de hipóteses por meio dos valores *p-value* para análise da média pela distribuição *t* de *Student's* e da variância pela Análise de Variância (ANOVA), adotando intervalo de confiança de 95% e 14 graus de liberdade. Amostras com *p-value* menor que o nível de significância (5%) foram consideradas significativamente diferentes, destacando que a condição de amostras significativamente iguais deve satisfazer a igualdade da média e da variância [8].

2.3 Avaliação da resistência à corrosão

A resistência à corrosão foi investigada a partir de medidas eletroquímicas executadas por meio do ensaio de polarização potenciodinâmica com uso de um potenciostato Vertex modelo 100 mA. EIS – 1 MHz, adotando corpos de prova idênticos aos usados para a análise microestrutural, mas sem ataque químico, adotando uma área de 10 mm² para a análise do processo corrosivo com uso de 3 corpos de prova para cada uma das condições de tratamento térmico.

Para este ensaio foi utilizada uma célula eletroquímica composta por um eletrodo de trabalho e um eletrodo de referência de Ag/AgCl, além de um contra eletrodo de platina

espiralado. Como eletrólito foi utilizada uma solução padrão, 3,5% em massa de NaCl com água destilada, representando o meio salino ao qual o material é tipicamente empregado [9].

3 Resultados e discussões

3.1 Caracterização microestrutural

Na Figura 1 são observadas as micrografias referentes ao aço duplex UNS S31803, com identificação dos constituintes ferrita, (α) seta verde, austenita (γ) seta azul e sigma (σ) seta vermelha [10].

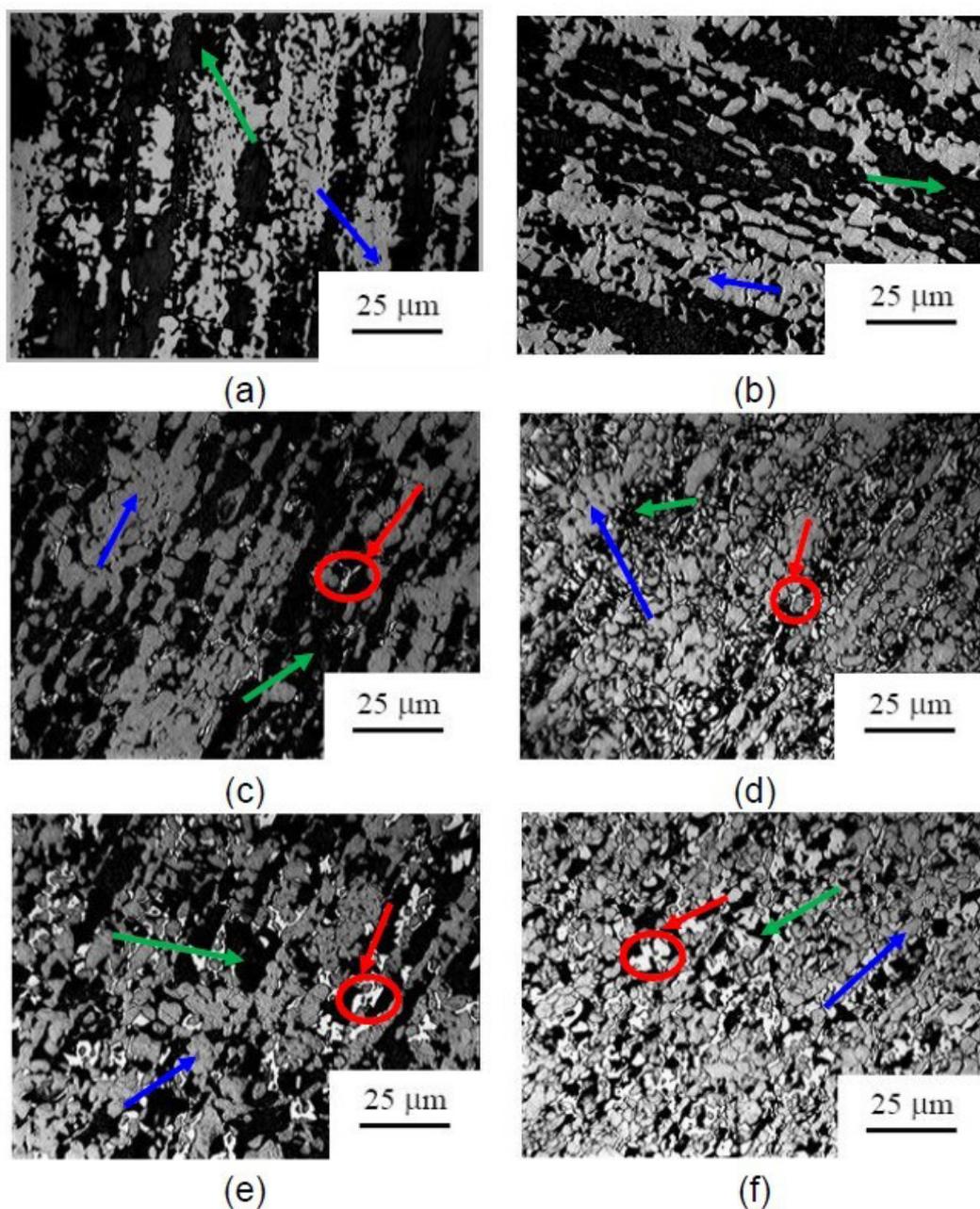


Figura 1. (a) Recebido, (b) Solubilizado a 1050 °C por 5 minutos, (c) Envelhecido a 800 °C por 20 minutos, (d) Envelhecido a 800 °C durante 60 minutos, (e) Envelhecido a 900 °C durante 20 minutos e (f) Envelhecido a 900 °C durante 60 minutos.

Nas Figuras 1a, b é possível identificar a microestrutura característica desse aço com a presença de grãos de austenita alongados em uma matriz de ferrita, com alteração da quantidade dessas fases após a solubilização, Figura 1b. A presença da fase sigma é percebida a partir da Figura 1c, sendo a quantidade dessa fase maior para o tempo de 60 minutos, para as duas temperaturas investigadas de tratamento térmico, Figuras 1c-f, indicando que o tempo de encharque influenciou na formação dessa fase.

A análise semiquantitativa das fases ferrita e austenita nos estados como recebido e solubilizado é exibida na Tabela 1.

Os valores semiquantitativos dispostos na Tabela 1 são compatíveis com a fotomicrografia exibida na Figura 1b onde, após a amostra ser submetida ao tratamento térmico de solubilização, apresentou proporções semelhantes de γ e α .

O percentual da fase sigma em função das condições de envelhecimento é apresentado na Figura 2 com a indicação dos valores da média amostral e das faixas de variação desses valores para cada uma das condições analisadas [5].

Os dados apresentados na Figura 2 indicam que a formação da fase sigma dependeu mais do tempo que da temperatura adotada para o tratamento térmico de envelhecimento, sendo tal comportamento comum em aços inoxidáveis que apresentam essa fase, por considerar que para uma mesma temperatura de envelhecimento, o aumento do tempo de encharque favorece o desenvolvimento da fase sigma em detrimento à fase ferrita [11].

Na análise da Figura 3 é possível perceber que a fase sigma está mais fragmentada e espalhada após o envelhecimento realizado a 800 °C durante 20 minutos (Figura 3a), enquanto a amostra envelhecida a 800 °C por 60 minutos (Figura 3b) apresenta uma morfologia intermediária. Para a fase sigma referente às condições exibidas nas Figuras 3c e 3d pode-se observar que a fase sigma é maior e menos fragmentada, sendo ainda lamelar.

Pohl et al. [10] ao investigarem o aço duplex UNS S31803 verificaram que para temperaturas menores que 800 °C a fase sigma se apresenta com uma morfologia fragmentada, conhecida como *coral-like*. Nessa temperatura, o número de núcleos formados no início da precipitação da fase sigma é maior, ocasionando uma menor distância necessária à difusão dos elementos formadores da fase σ , como molibdênio e cromo.

Deste modo, em temperaturas menores poderá ocorrer a supersaturação local e, conseqüentemente, uma dispersão maior de precipitados de fase σ , deixando a morfologia fragmentada. Já quando a taxa de difusão é maior, em temperaturas superiores a 900°C, a fase sigma tende a ser maior e menos fragmentada, devido à menor taxa de nucleação. Por fim, pode-se afirmar que essa variação da morfologia da fase sigma influenciará as respostas mecânica e à corrosão [10].

É possível perceber ainda a presença da fase chi, χ , na Figura 3a para a amostra envelhecida a 800 °C por 20 minutos. Essa fase é tipicamente formada nos primeiros instantes do tratamento térmico de envelhecimento e posteriormente se decompõe na fase sigma [7,11].

É possível verificar que o aumento do tempo de encharque para a amostra envelhecida a 800°C eliminou a presença da fase χ , possivelmente transformada em fase σ , Figuras 3c, d, [11].

Tabela 1. Fração volumétrica das fases ferrita e austenita nos estados como recebido e solubilizado

Fases	Como Recebido	Solubilizado
Ferrita	36% ± 4	49% ± 5
Austenita	64% ± 4	51% ± 5

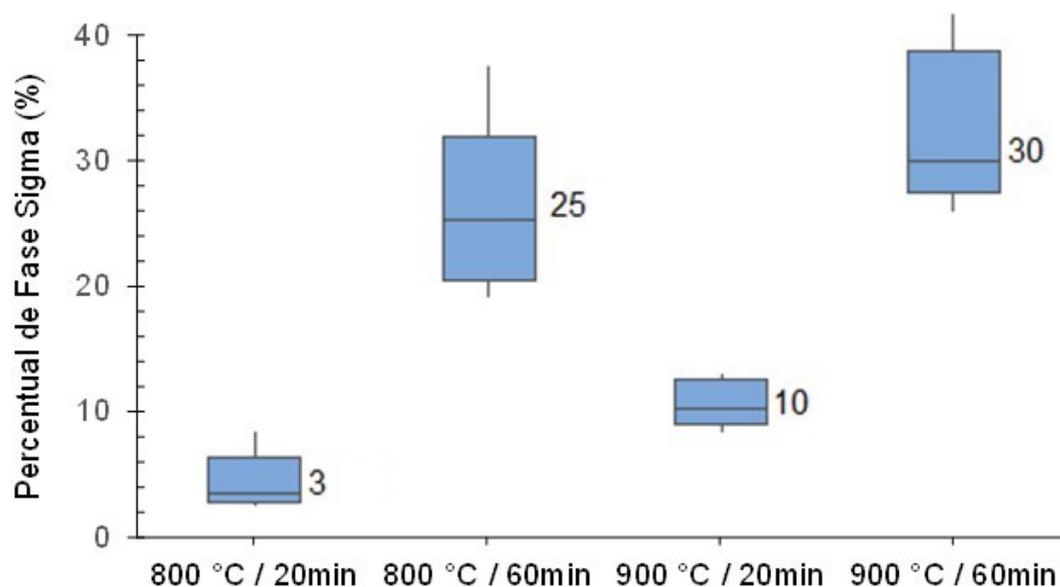


Figura 2. Percentual da fase sigma para as amostras envelhecidas.

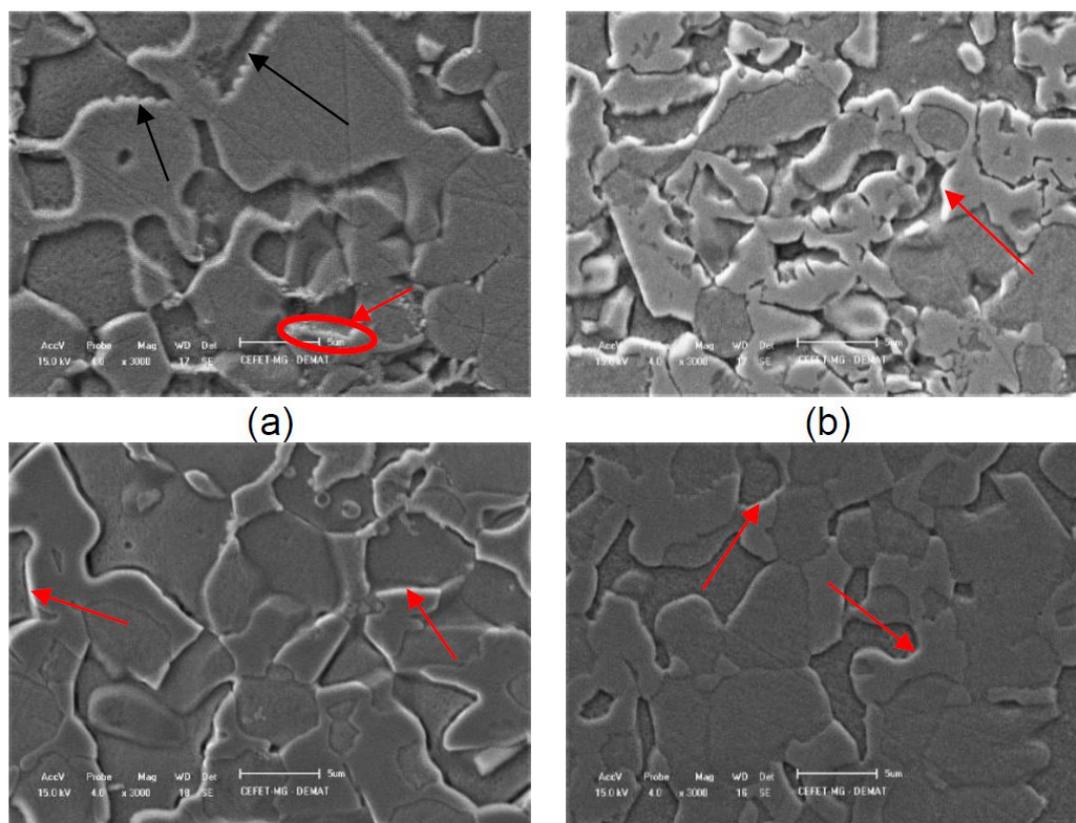


Figura 3. Micrografia de amostras envelhecidas: (a) 800 °C por 20 minutos; (b) 800 °C por 60 minutos, (c) 900 °C por 20 minutos e (d) 900 °C por 60 minutos.

3.2 Caracterização mecânica

Na Figura 4 são mostrados os valores de dureza Vickers média para os diferentes estados do aço UNS 31803. De modo análogo, é apresentado na Tabela 2 o estudo estatístico para essa propriedade com uso do *p-value* para avaliar a igualdade ou não dos valores de dureza entre as condições de tratamento térmico. Os dados revelam que não houve mudança da dureza Vickers entre os estados como recebido e solubilizado, assim como entre as condições de envelhecimento realizadas durante 20 minutos nas temperaturas de 800 °C e 900 °C.

Nos demais casos nota-se a mudança significativa da dureza Vickers após a realização dos tratamentos térmicos de envelhecimento em relação ao estado solubilizado, como indicado pelos valores *p-value* de *t-Student's* na Tabela 2. O envelhecimento conduzido a 800 °C durante 60 minutos exibiu o maior aumento da dureza após o envelhecimento. Esse aumento da dureza confirma o efeito da presença e da morfologia da fase sigma no aumento da resistência mecânica do aço UNS S31803, como mostrado nas Figuras 2 e 3.

O resumo das propriedades mecânicas do aço UNS S31803 em tração é apresentado na Tabela 3, sendo observado que os parâmetros de resistência mecânica, LE

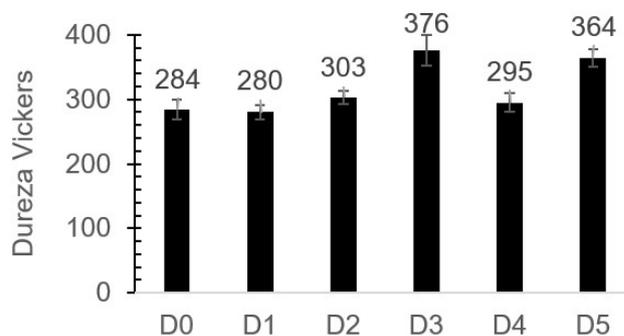


Figura 4. Dureza Vickers em função das condições do aço UNS S31803. D0: como recebido; D1: solubilizada a 1050 °C por 5 minutos; D2: Envelhecida a 800 °C por 20 minutos; D3: Envelhecida a 800 °C por 60 minutos; D4: Envelhecida a 900 °C por 20 minutos; D5: Envelhecida a 900 °C por 60 minutos.

e $\sigma_{\text{máx}}$ aumentaram com o tempo de encharque, enquanto o de ductilidade, expresso pelo valor de $e_{\text{máx}}$, reduziu. Esse comportamento é associado à presença e ao arranjo assumido pela fase sigma, como observado nas Figuras 1 e 3, de modo que a fase sigma exibida nessas figuras passa a atuar como um sítio nucleador de tensões residuais, favorecendo o aumento da resistência mecânica e a redução da ductilidade

Tabela 2. Valores *p-value* para análise estatística em termos da média (*t-Student's*) e da variância (ANOVA) para a dureza Vickers (HV) em função das condições do aço UNS S31803 com conclusão

Condições	<i>P-value t-Student's</i>	<i>P-value ANOVA</i>	Conclusão
Recebido e Solubilizado	0,518	0,272	Iguais
Solubilizado e 800 °C/ 20 min	0,000	0,894	Diferentes
Solubilizado e 800 °C/ 60 min	0,000	0,008	Diferentes
Solubilizado e 900 °C/ 20min	0,006	0,351	Diferentes
Solubilizado e 900 °C / 60 min	0,000	0,008	Diferentes
800 °C / 20 min e 800 °C / 60 min	0,000	0,006	Diferentes
900 °C / 20 min e 900 °C / 60 min	0,000	0,730	Diferentes
800 °C / 20 min e 900 °C / 20 min	0,071	0,287	Iguais
800 °C / 60 min e 900 °C / 60 min	0,903	0,035	Diferentes
800 °C / 20 min e 900 °C / 60 min	0,000	0,470	Diferentes
800 °C / 60 min e 900 °C / 20 min	0,000	0,074	Diferentes

Tabela 3. Resumo das propriedades mecânicas em tração aço UNS S31803 em função da condição

Condições	LE (MPa)	s_{\max} (MPa)	e_{\max} (%)
Solubilizado	497 ± 6	727 ± 74	21 ± 2
800°C/20 minutos	523 ± 32	823 ± 26	9 ± 2
800°C/60 minutos	533 ± 30	835 ± 83	4 ± 3
900°C/20 minutos	468 ± 9	791 ± 4	16 ± 4
900°C/60 minutos	507 ± 12	831 ± 22	5 ± 2

LE: limite de escoamento; s_{\max} : tensão convencional máxima; e_{\max} : deformação convencional máxima.

Tabela 4. Resumo das propriedades mecânicas do aço UNS S31803 em flexão

Condições	Tensão máxima (MPa)	Flecha máxima (mm)
Solubilizado	1051 ± 1	15 ± 1
800°C/20 minutos	1243 ± 2	15 ± 2
800°C/60 minutos	1644 ± 2	20 ± 1
900°C/20 minutos	1228 ± 3	15 ± 2
900°C/60 minutos	1441 ± 4	14 ± 1

do material, comprometendo a ductilidade do mesmo [10]. Nota-se ainda, como detectado para os resultados de dureza Vickers, que a maior variação da resistência mecânica e da ductilidade do aço UNS S31803 em relação ao estado solubilizado ocorreu para o envelhecimento conduzido a 800 °C durante 60 minutos.

Esses resultados de dureza Vickers e de tração confirmam que os aços inoxidáveis duplex quando aquecidos entre 300 °C a 1100 °C podem apresentar fases secundárias que afetam as propriedades mecânicas, causando, por exemplo, a elevação da resistência e a consequente redução da ductilidade na presença da fase sigma [3,10,12].

Os resultados obtidos para a caracterização mecânica em flexão corroboram com os aqueles obtidos na caracterização em tração. Novamente, o tempo de encharque foi a variável que mais influenciou no valor da tensão máxima em flexão, sendo esta maior para o tempo de encharque de 60 minutos, para as duas temperaturas de envelhecimento (Tabela 4).

Contudo, ao contrário do observado em tração, a ductilidade do aço UNS S31803 quando caracterizado em flexão, indicada pelo valor da flecha máxima, não mudou significativamente com a modificação da temperatura e do tempo adotados no tratamento térmico de envelhecimento,

sendo inclusive maior para a condição de maior aumento da resistência mecânica (20 mm).

Os resultados detectados em flexão (Tabela 4) atestam que o aço UNS S31803 manteve a tenacidade após o tratamento térmico de envelhecimento, mesmo com quantidade elevada da fase sigma (~ 25% para o envelhecimento conduzido a 800 °C durante 60 minutos, Figura 2). Este tipo de comportamento não é típico, uma vez que a resistência mecânica tende a aumentar e a ductilidade diminuir quando em presença da fase sigma [12]. Deste modo, pode-se afirmar que sob a solicitação em flexão, que combina os esforços de compressão e de tração, possibilitou ao aço UNS S31803 a manutenção da tenacidade após os envelhecimentos apresentados neste trabalho, sendo isso associado a uma possível modificação do arranjo dessa fase quando deformado em flexão [13].

3.3 Resistência à corrosão

Na Figura 5 são apresentadas as curvas do potencial aplicado (E) em função do logaritmo da densidade da corrente (A/cm^2), obtidas no ensaio de polarização potenciodinâmica para as amostras solubilizada e envelhecidas, sendo escolhida uma curva para representar cada condição de tratamento térmico.

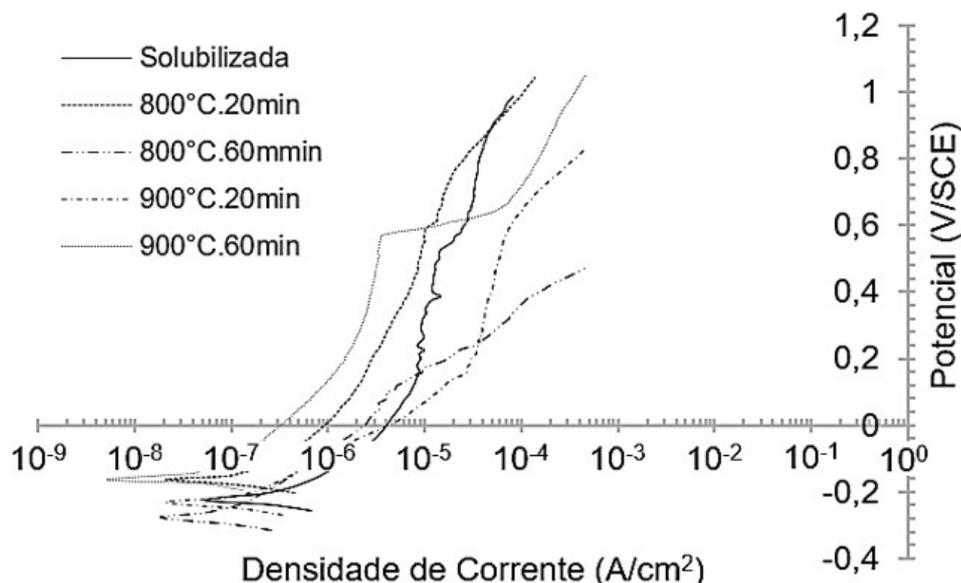


Figura 5. Curvas de polarização das amostras solubilizadas e envelhecidas aço UNS S31803.

Tabela 5. Parâmetros de corrosão do aço UNS S31803 solubilizado e envelhecido

Condições	E_{corr} (V)	i_{corr} (A / cm ²)	E_p (V)	i_p (A / cm ²)
Solubilizado	-0,22 ± 0,04	$2,8 \cdot 10^{-7} \pm 1,6 \cdot 10^{-8}$	0,66 ± 0,08	$1,0 \cdot 10^{-5} \pm 0,8 \cdot 10^{-6}$
800°C/20 minutos	-0,17 ± 0,07	$9,6 \cdot 10^{-8} \pm 1,8 \cdot 10^{-9}$	0,58 ± 0,01	$1,0 \cdot 10^{-5} \pm 0,1 \cdot 10^{-6}$
800°C/60 minutos	-0,27 ± 0,02	$6,3 \cdot 10^{-8} \pm 2,2 \cdot 10^{-9}$	0,09 ± 0,05	$5,7 \cdot 10^{-6} \pm 2,2 \cdot 10^{-6}$
900°C/20 minutos	-0,23 ± 0,02	$1,0 \cdot 10^{-7} \pm 0,7 \cdot 10^{-8}$	0,60 ± 0,07	$1,0 \cdot 10^{-5} \pm 1,3 \cdot 10^{-6}$
900°C/60 minutos	-0,16 ± 0,04	$4,0 \cdot 10^{-8} \pm 0,1 \cdot 10^{-9}$	0,70 ± 0,03	$1,0 \cdot 10^{-6} \pm 0,8 \cdot 10^{-7}$

E_{corr} : potencial de corrosão; i_{corr} : densidade de corrente de corrosão; E_p : potencial de pite; i_p : densidade de corrente passiva

As curvas apresentaram formas distintas, evidenciando que a amostra envelhecida a 900 °C por 60 minutos foi a mais resistente à corrosão pelo fato de ter apresentado um valor reduzido de densidade de corrente anódica ($\sim 10^{-8}$ A / cm²), indicando que a camada passiva se mostrou mais protetora. No entanto, esse resultado não era esperado para esta condição uma vez que houve uma a formação de 30% de fase sigma. Contudo, a presença da fase sigma distribuída de modo uniforme e com morfologia maior e menos fragmentada, como observado na micrografia da Figura 1f e na imagem de MEV apresentada na Figura 3d, possibilita a criação de uma camada protetiva que dificulta a transferência de carga na superfície do metal [10].

A amostra que apresentou a menor resistência à corrosão foi envelhecida a 800 °C por 60 minutos, também com elevada formação de fase sigma, 25%, mas com morfologia diferente, menor e mais fragmentada, denominada de *coral-like*, como observado na imagem de MEV da Figura 3b, o que facilitaria o processo corrosivo por oferecer mais sítios corrosivos, o que também contribuiu para ser esta a condição mais resistente mecanicamente, vide item 3.2 [10].

Das curvas de polarização foram extraídos os valores do potencial de corrosão (E_{corr}); da densidade de corrente de corrosão (i_{corr}); do potencial de pite (E_p), o qual se refere ao

potencial onde há a quebra da camada passiva e da densidade de corrente passiva (i_p), referente à corrente da região de passivação quando o potencial aumenta e a corrente permanece constante [12]. Na Tabela 5 são apresentados os resultados dos parâmetros de corrosão para cada condição avaliada.

O menor valor para o potencial de corrosão, E_{corr} , ocorreu para a amostra envelhecida a 800 °C durante 60 minutos, -0,27 V, indicando, assim como notado nas análises microestruturais e mecânicas ser essa a condição de maior tendência ao processo corrosivo, além de ter exibido o menor valor para o potencial de pite, E_p , 0,09 V.

Já os valores de densidade de corrente de corrosão, i_{corr} , indicam que o aço inoxidável duplex apresentou uma alta resistência à corrosão em solução de 3,5% de NaCl, mas não ficou imune à corrosão, pois houve a quebra do filme passivo posteriormente [14].

Todas as amostras apresentaram valores de densidade de corrente passiva (i_p) entre 10^{-5} A / cm² a 10^{-6} A / cm², típicos de aços inoxidáveis [14].

Por fim, pode-se afirmar que de modo geral, ao considerar a análise estatística de todos os parâmetros de corrosão mostrados na Tabela 5, que a resistência à corrosão também dependeu do tempo de envelhecimento, além da presença e, principalmente, da morfologia da fase sigma.

4 Conclusões

Os resultados exibidos pelo aço inoxidável duplex do tipo UNS S31803 indicaram:

- a) a formação da fase sigma para todas as condições de envelhecimento investigadas neste trabalho;
- b) o tempo de encharque foi a principal variável que afetou a o aumento da resistência mecânica, a redução da ductilidade e a redução da resistência à corrosão;
- c) ao mudar o modo de caracterização mecânica, de tração para flexão verificou-se a ausência de sensibilidade da ductilidade para esse modo de caracterização;

- d) a morfologia e a distribuição da fase sigma afetaram a resistência mecânica e à corrosão das amostras envelhecidas. Os testes eletroquímicos indicaram a maior resistência à corrosão em meio salino da amostra envelhecida a 900 °C por 60 minutos e a menor resistência à corrosão para a amostra envelhecida a 800 °C por 60 minutos.

Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES, CNPq, FAPEMIG, ao CEFET-MG e à UFMG pelo desenvolvimento da pesquisa.

Referências

- 1 Martins M, Casteletti LC. Microstructural characteristics and corrosion behavior of a super duplex stainless steel casting. *Materials Characterization*. 2008;60:150-155.
- 2 Nilsson JO. Super duplex stainless steel. *Materials Science and Technology*. 1992;08:685-700.
- 3 Presoti M, Martins FVC, Wanner EF, Lopes W. Simulation via artificial neural networks and mechanic behavior analysis of steel AISI 430. *IEEE Latin American Transactions*. 2016;14(4):1972-1979.
- 4 Silva AL, Mei PR. *Aços e Ligas Especiais*. 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher; 2010.
- 5 ASTM International. ASTM E652: Standard test method for determining volume fraction by systematic manual point count. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials; 2011.
- 6 Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 6892: Materiais metálicos: ensaio de tração à temperatura ambiente. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas; 2018.
- 7 ASTM International. ASTM E290-14: Standard test methods for bend testing of material for ductility. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials; 2014.
- 8 Astruc L, Meulaere M. D, Witz J. F, Nováček V, Turquier F. Characterization of the anisotropic mechanical behavior of human abdominal wall connective tissues. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2018;82:45-50.
- 9 ASTM International. ASTM G3-94. Standard recommended practice for conventions applicable to electrochemical measurements in corrosion testing. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials; 1994.
- 10 Pohl M, Storz O, Glogowski T. Effect of intermetallic precipitations on the properties of duplex stain less steel. *Materials Characterization*. 2007;58:65-71.
- 11 Wang YQ, Han J, Wu HC, Yang B, Wang XT. Effect of sigma phase precipitation on the mechanical and wear properties of Z3CN20.09M cast duplex stainless steel. *Nuclear Engineering and Design*. 2013;259:1-7.
- 12 Abra-Arzola J. L, García-Rentería MA, Cruz-Hernández VL, García-Guerra J, Martínez-Landeros VH, Falcón-Franco LA, Curiel-López FF. Study of the effect of sigma phase precipitation on the sliding wear and corrosion behaviour of duplex stainless steel AISI 2205. *Wear*. 2018;400-401:43-51.
- 13 Wang C, Wu Y, Guo Y, Guo J, Zhou L. Precipitation behavior of sigma phase and its influence on mechanical properties of a Ni-Fe based alloy. *Journal of Alloys and Compounds*. 2019;784:266-275.
- 14 Yang Y, Zeng H, Xin S, Hou X, Li M. Electromechanical corrosion behavior of 2205 duplex stainless steel in hot concentrated seawater under vacuum conditions. *Corrosion Science*. 2020;165:1-10.

Recebido em: 26 Jul. 2020

Aceito em: 18 Nov. 2020