

# EFEITO DA TEMPERATURA DE RECOZIMENTO NA CORROSÃO POR PITE DO AÇO INOXIDÁVEL LEAN DUPLEX UNS S32304\*

*Raphael França Assumpção<sup>1</sup>  
Daniela Barçante Perasoli<sup>1</sup>  
Paula Oliveira Malta<sup>2</sup>  
Dagoberto Brandão Santos<sup>3</sup>  
Dalila Chaves Sicupira<sup>4</sup>*

## Resumo

O aço inoxidável duplex(AID) combina as propriedades mecânicas da ferrita à resistência à corrosão da austenita, sendo muito utilizado em aplicações industriais que requerem um bom desempenho quanto a essas propriedades. A classe *lean* duplex foi desenvolvida para minimizar as flutuações de custo, reduzindo elementos caros como Ni e Mo, sem grande efeito em relação à corrosão e propriedades mecânicas. O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito da temperatura de recozimento na microestrutura, dureza e corrosão por pite de um aço inoxidável UNS S32304. Investigações microestruturais foram realizadas usando um microscópio eletrônico de varredura. A resistência à corrosão foi estudada por meio da técnica de polarização potenciodinâmica cíclica. As amostras apresentaram uma elevada resistência ao início da corrosão por pite em solução de NaCl 3,5%. Apesar da existência da similaridade entre os valores de potencial de circuito aberto, a temperatura de recozimento mostrou ter grande influência na resistência a corrosão do aço. A temperatura de recozimento afetou a estrutura e a composição dos filmes passivos na superfície do aço inoxidável duplex. O recozimento a 1000°C levou a uma maior resistência a corrosão localizada.

**Palavras-chave:** Aço inoxidável duplex; Recozimento; Corrosão por pite.

## Effects of Annealing Temperature on Pitting Corrosion of UNS S32304 Lean Duplex Stainless Steels

### Abstract

Duplex stainless steel (DSS) has been considered as an excellent alternative for applications in which high corrosion resistance and high mechanical strength are required. Lean duplex grade has been developed to minimize cost fluctuations by reducing expensive elements such as Ni and Mo without affect their corrosion and mechanical properties. The aim of this paper was to evaluate the effect of annealing temperature on microstructure, hardness, and pitting corrosion of an UNS S32304 lean duplex stainless steel. Microstructural investigations were carried out using a scanning electron microscope. The corrosion resistance was studied by cyclic potentiodynamic polarization technique. The samples exhibited a high corrosion resistance in 3.5% NaCl solution. Despite the existence of similarity among the open circuit potential values, the annealing temperature showed important influence on the corrosion resistance of the steel. Annealing temperature affected the structure and composition of the passive films on the surface of duplex stainless steel. Annealing the specimens at 1000°C led to higher resistance to localized corrosion.

**Keywords:** Duplex stainless steel; Annealing; Pitting corrosion.

\* Contribuição técnica ao 18º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, parte integrante da ABM Week, realizada de 02 a 04 de outubro de 2018, São Paulo, SP, Brasil.

- <sup>1</sup> Engenharia Metalúrgica, Graduando, Estudante, Departamento de Engenharia Metalúrgica e Materiais, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, Brasil.
- <sup>2</sup> Engenharia Química, Doutoranda, Estudante, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil.
- <sup>3</sup> Engenharia Metalúrgica, Doutor, Professor, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil.
- <sup>4</sup> Química, Doutora, Professora, Departamento de Química, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento dos aços duplex ocorreu no início do século XX com objetivo de produzir aços resistentes à corrosão. Desde meados do século XX, o consumo mundial desses aços aumenta cerca de 6% e em consequência do rápido crescimento do número de aplicações tornou-se indispensável o estudo das propriedades de cada uma das classes de aços inoxidáveis [1].

Os aços inoxidáveis constituem uma família de aços de alta liga com base nos sistemas Fe-Cr, Fe-Cr-C e Fe-Cr-Ni. Para serem considerados inoxidáveis devem possuir um teor mínimo de cromo de 10,5% em peso, o que possibilita a formação espontânea de um fino filme de óxido de cromo ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ), sendo este firmemente aderido ao metal e extremamente protetor em diversos ambientes corrosivos. No entanto, se forem expostos em ambientes mais agressivos, maiores teores de Cr devem ser adicionados para proteção contra formação de pites [2,3].

Além do Cr, elementos como o Mo, Ni, N podem ser adicionados para promover a estabilização das fases e, conseqüentemente, um melhor ajuste de propriedades mecânicas e resistência à corrosão. Os aços inoxidáveis podem ser divididos em ferríticos, austeníticos, martensíticos, endurecidos por precipitação e os aços duplex, sendo o último o foco desse trabalho [4].

Os aços inoxidáveis duplex (AID) estão sendo amplamente utilizados como alternativas para aços inoxidáveis austeníticos e ligas à base de níquel [5]. Representam uma classe importante de aços com uma combinação de resistência mecânica e à corrosão em ambientes contendo íons cloreto [6]. A fim de proporcionar a melhor combinação de resistência à corrosão e resistência mecânica do AID, a microestrutura deve ser constituída por quantidades aproximadamente iguais de fases austeníticas e ferríticas, bem como a falta de precipitação de fases secundárias prejudiciais tais como  $\sigma$ ,  $\chi$ ,  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  e  $\text{Cr}_2\text{N}$  [7,8].

Os elementos de ligas são os responsáveis pelo equilíbrio entre as fases. Em uma microestrutura de aço inoxidável duplex, os principais elementos de liga são carbono, cromo, níquel, molibdênio, tungstênio, nitrogênio e cobre. Esses não são distribuídos uniformemente na ferrita e austenita. Cromo, molibdênio e tungstênio enriquecem a ferrita, enquanto carbono, níquel, nitrogênio e cobre são concentrados na austenita [7].

Além da composição química, outro fator importante é a temperatura de recozimento, que influencia a resistência à corrosão dos aços inoxidáveis duplex. Em uma determinada composição química, a variação da temperatura de recozimento pode mudar a proporção das fases ferrita e austenita e ajustar a redistribuição de elementos de liga em ambas, trazendo variação da resistência à corrosão de cada uma. Por outro lado, a temperatura inadequada do tratamento térmico pode resultar em fases secundárias deletérias. Estes precipitados secundários deterioram a tenacidade e a resistência à corrosão do aço [9,10].

Neste contexto, o objetivo desse trabalho foi avaliar o efeito da temperatura de recozimento na resistência à corrosão do aço inoxidável duplex UNS S32304. Este tipo de abordagem científica é relevante para melhorar a aplicabilidade e desempenho do material e processos estudados.

## 2 DESENVOLVIMENTO

O aço inoxidável duplex UNS 32304 foi fornecido pela empresa Aperam South America e sua composição química é apresentada na Tabela 1.

**Tabela 1.** Composição química do aço UNS S32304

| C     | Cr    | Ni   | Mo    | Mn   | Si    | P    | Cu    | S      | N     | Fe   |
|-------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|--------|-------|------|
| 0,011 | 22,87 | 4,20 | 0,275 | 1,45 | 0,201 | 0,02 | 0,453 | 0,0004 | 0,101 | bal. |

O aço foi recebido na forma de chapas laminadas a quente e recozidas com 4 mm de espessura. A laminação a quente foi realizada com uma temperatura inicial da placa de 1200°C, que foi reduzida para 1000°C na saída do último passe. As chapas laminadas a quente com dimensões de 15 mm de comprimento, 10,5 mm de largura e 4 mm de espessura foram destinadas ao processo de tratamento térmico de recozimento de solubilização a 1100°C por 1800s em laboratório e posteriormente laminadas a frio até uma espessura de 1 mm em um laminador de laboratório. Em seguida foram recozidas isotermicamente durante 180s à 950°C, 1000°C e 1050°C, seguindo-seo resfriamento em água à temperatura ambiente. Temperaturas abaixo de 900°C não foram utilizadas para evitar a formação de fases secundárias, como os carbonetos, geralmente observados em aços duplex na faixa de temperatura de 550-650°C, assim como os nitretos e a fase- $\chi$  formados entre 700 e 900°C [11].

A análise microestrutural foi realizada utilizando um microscópio eletrônico de varredura (FEI Inspect™ S50). As amostras foram preparadas seguindo procedimentos metalográficos convencionais, polimento com pasta diamantada de 1 $\mu$ m e utilizando o reativo de Behara para o ataque químico.

A dureza Vickers (HV) foi medida utilizando um microdurômetro (Future Tech FM-700). Os valores de HV foram calculados a partir de vinte endentações aleatórias, usando um tempo de permanência de 10 s e uma carga de 300 gf.

As amostras utilizadas para o ensaio de corrosão foram cortadas com dimensão de 1 cm<sup>2</sup> e soldadas com fios de cobre por meio de máquinas de solda por resistência e, posteriormente, embutidas em resina acrílica. Por fim, para a realização do ensaio de corrosão as amostras foram lixadas até 600 mesh. A região de contato entre a amostra e a resina foi selada com araldite para evitar corrosão por frestas.

A resistência à corrosão por pite de cada condição foi avaliada utilizando a técnica de polarização potenciostática cíclica em solução de NaCl 3,5% à temperatura ambiente. Os testes de polarização cíclica foram realizados em uma célula convencional de três eletrodos utilizando uma placa de Pt como eletrodo auxiliar e um eletrodo Ag/AgCl como eletrodo de referência. O equipamento utilizado foi um potenciostato da marca Autolab, modelo PGSTAT302N. Os testes foram realizados segundo a Norma ASTM G 61 [12]. A polarização foi iniciada após 3600s de estabilização do potencial de circuito aberto (OCP). Aplicou-se uma taxa de varredura na direção anódica de 1,0 mV/s até se atingir uma densidade de corrente de 1 mA/cm<sup>2</sup>. Neste ponto, a varredura foi revertida para direção catódica até o valor de OCP ser atingido. Os testes eletroquímicos foram realizados em triplicata. A caracterização dos pites após o teste eletroquímico foi feita através da técnica de microscopia eletrônica de varredura (TESCAN VEGA-3).

As Figuras 1 e 2 mostram as micrografias eletrônica de varredura (MEV) das amostras nas condições de laminado a quente e recozido como fornecido pela empresa (LQ), recozido a 1100°C por 1800s (1100°C/1800s), laminado a frio (LF),

recozido por 180s nas temperaturas de 950°C (950°C/180s), 1000°C (1000°C/180s) e 1050°C (1050°C/180s). Nas imagens obtidas pelo MEV, o contraste entre as fases não foi tão pronunciado, logo a identificação das fases pode ser feita através do relevo. O reativo utilizado ataca preferencialmente a ferrita, salientando a austenita.

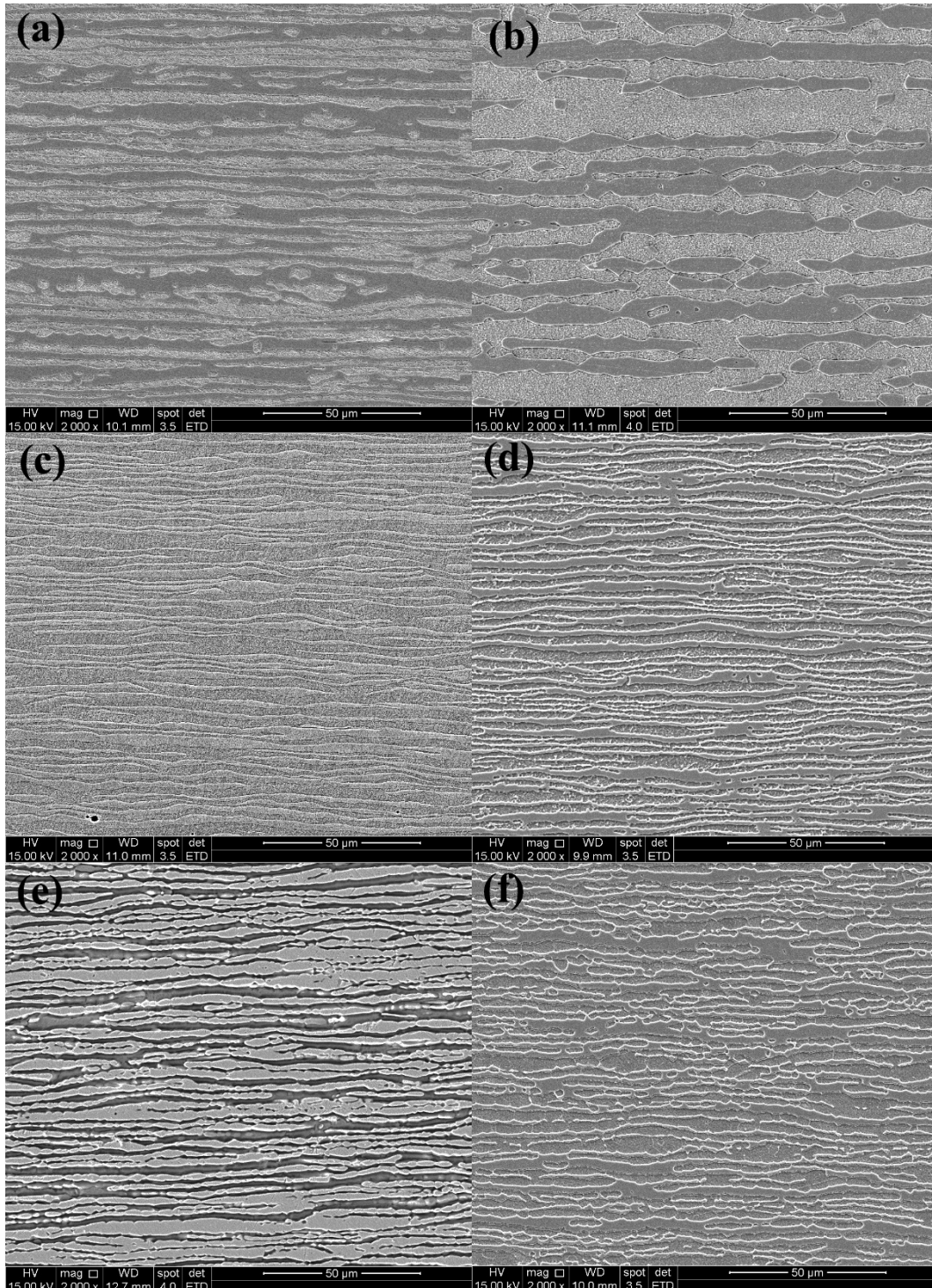


Figura 1. Aço duplex UNS S32304 (a) LQ, (b) recozido a 1100°C / 1800s, (c) LF, (d) recozido a 950°C / 180s, (e) recozido a 1000°C / 180s, (f) recozido a 1050°C/180s.

A laminação a quente (Figura 1(a)) resultou em uma microestrutura parcialmente encruada com grãos alongados ao longo da direção de laminação. Ambas as fases

desenvolveram uma estrutura típica em forma de lamelas, consistindo de lamelas alternadas de austenita e ferrita. Após o tratamento de recozimento (Figura 1(b)), observou-se faixas de austenita incorporadas na matriz de ferrita, uma vez que ocorreu o crescimento e coalescimento dos grãos das duas fases. Além disso, observaram-se quebras na continuidade das lamelas de austenita, indicando que parte da fase austenítica é transformada em ferrita e que os grãos ferríticos cresceram à medida que as lamelas de austenita foram consumidas [13]. Após a laminação a frio (Figura 1(c)), foi observado o refino de grãos com considerável redução no espaçamento entre fases.

O recozimento isotérmico a 950°C (Figura 1(d)) mostrou pouca diferença quando comparado ao estado anterior. Então, a microestrutura alongada com lamelas alternadas entre as fases se manteve, com o aparecimento da fase austenita entre as lamelas. O aumento da temperatura (Figura 1(e) e (f)) não alterou de forma significativa a microestrutura do material.

A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos pelas medidas de dureza do aço. Os resultados mostraram que a deformação plástica aumentou acentuadamente a microdureza Vickers da ligaduplex UNS S32304, atingindo um valor de 425 HV após a laminação a frio.

**Tabela 2.** Valores de Microdureza Vickers obtidas.

| <b>Condição</b> | <b>HV</b> |
|-----------------|-----------|
| LQ              | 291       |
| 1100°C / 1800s  | 238       |
| LF              | 425       |
| 950°C / 180s    | 244       |
| 1000°C / 180s   | 243       |
| 1050°C / 180s   | 242       |

O tratamento térmico de recozimento de recristalização tem como um dos objetivos o alívio de tensões do material, podendo este, ser representado pela diminuição da dureza [13]. A recristalização e crescimento de grãos no processo de recozimento afeta de forma significativa a dureza do material [14].

O aumento da temperatura de recozimento de 950°C para 1050°C, levou a uma leve diminuição da dureza do aço. O fato pode ser explicado pela pequena mudança estrutural, uma vez que não foi observado aumento significativo da fração de ferrita (Figura 1(d,e,f)) em conjunto com as temperaturas de recozimento utilizadas [15,16].

Quando o aço duplex é submetido a deformações intensas, pode ocorrer transformação martensítica induzida por deformação a partir da austenita metaestável. A reversão da transformação martensítica induzida por deformação ocorre em temperaturas bem abaixo da temperatura de recristalização austenítica. Essa reversão ocorre de maneira parcial uma vez que para a reversão total a temperatura de trabalho se confundiria com a temperatura de recristalização da austenita [17].

Observou-se, após recozimento da amostra laminada a frio, a presença de austenita entre duas lamelas da fase. Observa-se também (Tabela 2) que a amostra laminada a frio possuiu uma dureza significativamente mais alta entre o estado anterior e posterior. Tal comportamento se deve à possibilidade da ocorrência da formação

demartensita induzida por deformação (MID) e da reversão desta transformação quando o material foi submetido ao tratamento de recozimento.

As Figuras 1 e 2 apresentam, respectivamente, os potenciais de circuito aberto e as curvas de polarização potenciodinâmica cíclica obtidas para amostras do aço inoxidável duplex UNS S32304 nas seis diferentes condições estudadas. Os valores médios de OCP e potencial de pites ( $E_{pit}$ ) juntamente com seus respectivos desvios-padrão estão resumidos na Tabela 3.

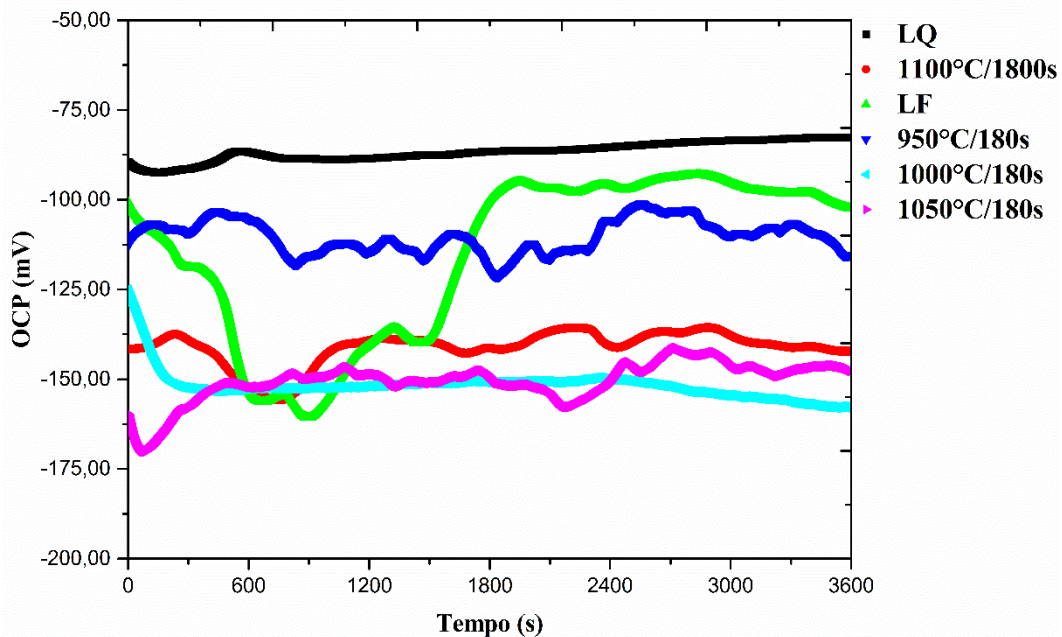


Figura 2. Potenciais de circuito aberto

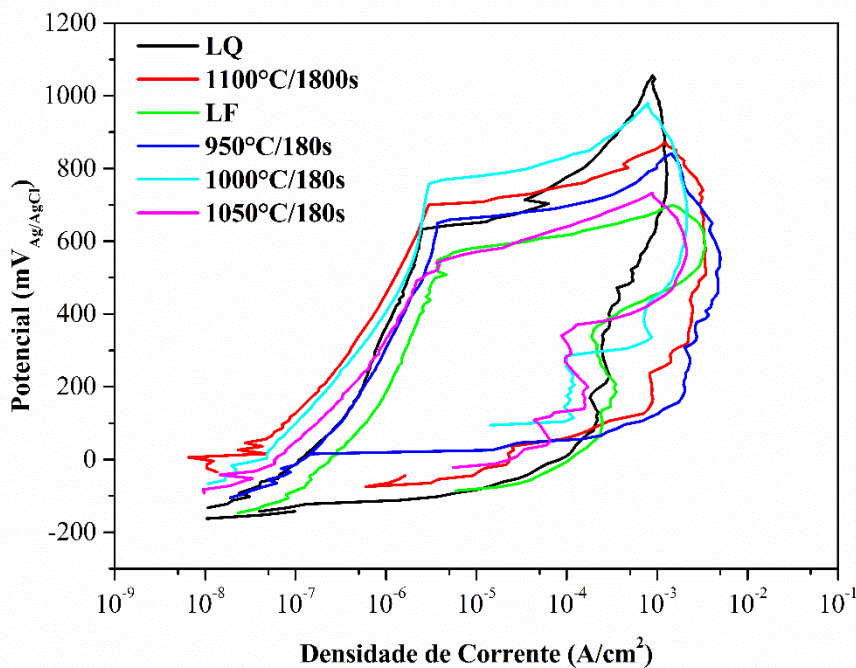


Figura 3. Curvas de polarização potenciodinâmica cíclica.

**Tabela 3.** Resultados experimentais

| Amostra        | OCP (mV) | Desvio padrão (mV) | Epit (mV) | Desvio padrão (mV) |
|----------------|----------|--------------------|-----------|--------------------|
| LQ             | -116     | 36                 | 659       | 32                 |
| 1100°C / 1800s | -114     | 61                 | 659       | 41                 |
| LF             | -85      | 32                 | 565       | 23                 |
| 950°C / 180s   | -115     | 30                 | 640       | 14                 |
| 1000°C / 180s  | -125     | 30                 | 699       | 90                 |
| 1050°C / 180s  | -144     | 9                  | 540       | 52                 |

Observaram-se regiões passivas largas para todas as amostras e potenciais de pites bastante superiores ao correspondente potencial de circuito aberto. Estas observações indicam que as amostras apresentaram excelente resistência ao início da corrosão por pite nesse ambiente de cloretos [6]. Considerando o desvio padrão, não foram observadas diferenças significativas nos valores de OCP.

A polarização mostrou uma histerese positiva, de modo que as amostras não apresentaram capacidade de repassivação em meio contendo cloreto. Isso indica que a corrosão por pite quando iniciada, mesmo em valores de potenciais próximos ao potencial de circuito aberto, pode ocorrer por longos períodos [6].

Avaliando a resistência à corrosão, observou-se que a amostra laminada a quente apresentou potencial de pite similar àquela recozida a 1100°C durante 1800s. Uma explicação razoável para a similaridade dos potenciais é um balanço entre os processos descritos a seguir:

(1) a diminuição de contornos de grãos e redução de discordâncias leva a um aumento do potencial de pite, uma vez que diminui possíveis pontos de nucleação [18];

(2) o recozimento a 1100°C leva a solubilização de possíveis fases secundárias, prejudiciais à resistência a corrosão do aço duplex, que podem ser precipitadas após a laminação a quente [11,19];

(3) por outro lado foi observado um aumento na fração de ferrita, o que pode ter levado a diminuição do potencial de pite [15];

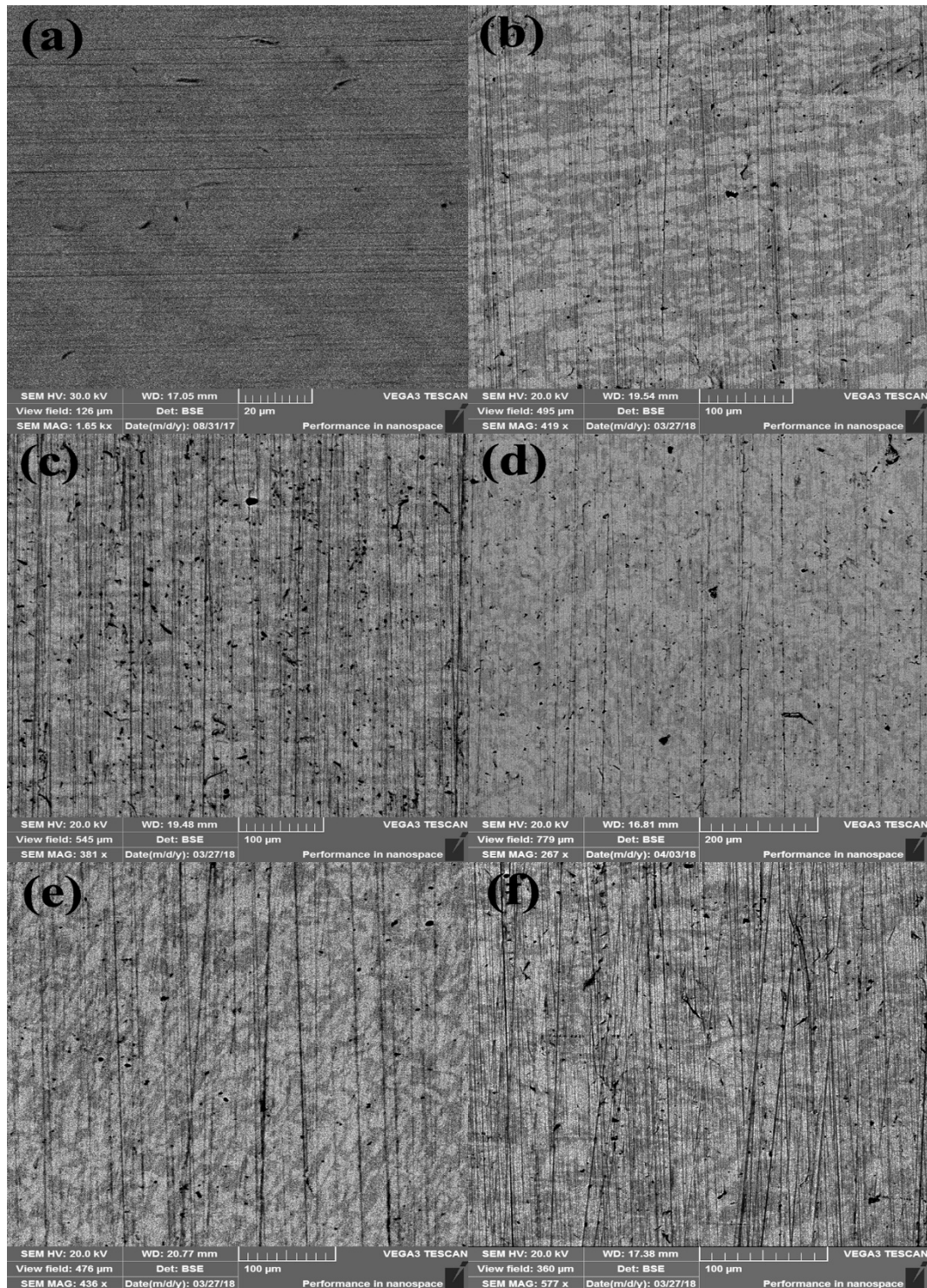
(4) pesquisas mostram que o aumento do tamanho de grão após recozimento em aços inoxidáveis austeníticos e ferríticos levam a diminuição da resistência do filme passivo [18,20,21].

Já a amostra laminada a frio apresentou menor potencial de pite comparado ao estado anterior, indicando a formação de um filme passivo menos resistente na superfície do aço. O resultado pode estar relacionado ao fato da laminação a frio aumentar a densidade de discordâncias, a ocorrência de tensão residual e a possibilidade de formação de MID, aumentando o número dos sítios anódicos ativos na superfície [18,22].

Após o recozimento, como esperado [15,18], notou-se um aumento no potencial de pite. O aumento da temperatura de recozimento de 950°C para 1000°C levou ao maior valor de Epit observado, porém a continuação do aumento da temperatura para 1050°C levou a uma queda significativa do potencial. À medida em que a temperatura de recozimento aumenta, os teores de cromo e molibdênio diminuem e o teor de níquel aumenta na fase da ferrita, enquanto a concentração de cromo e molibdênio na fase de austenita aumentam ligeiramente [23]. Logo, a mudança do potencial de pite se deve ao fato da composição de cada fase variar com a temperatura de recozimento, resultando em diferenças na resistência à corrosão da austenita e ferrita [9,10,23].



As amostras foram observadas utilizando microscopia eletrônica de varredura após teste eletroquímico (Figura 4), a fim de confirmar a corrosão por pite em solução salina. Pequenos pites foram encontrados tanto na fase austenítica quanto na fase ferrítica e na interface ferrita/austenita. Não foi observada diferença significativa entre a morfologia dos pites formados na amostra como fornecida e na amostra recozida a 1100°C/1800s (Fig. 4(a e b)). Observou-se na Fig. 4(c) a quebra do filme passivo em diversos pontos da microestrutura laminada a frio, devido à maior densidade de discordâncias. Notou-se a diminuição da quantidade de pites quando são submetidas ao tratamento térmico (Fig. 4(d,e,f)), principalmente na temperatura de recozimento que apresentou maior resistência à corrosão localizada (Fig. 4(e)).



**Figura 4.** Morfologia dos pites após os testes de polarização das amostras (a) LQ, (b) recozido a 1100°C / 1800s, (c) LF, (d) recozido a 950°C / 180s, (e) recozido a 1000°C / 180s, (f) recozido a 1050°C / 180s.

### 3 CONCLUSÕES

- ✓ A laminação a quente resultou em uma microestrutura parcialmente encruada, consistindo de lamelas alternadas de austenita e ferrita. Após o recozimento, observou-se o aumento da espessura e espaçamento das lamelas, que voltaram a diminuir de forma considerável após a laminação a frio. A deformação das fases austenita e ferrita ocorreu na direção de

laminação. O recozimento a 950°C, 1000°C e 1050°C não levou à significativas mudanças na microestrutura.

- ✓ As medições de microdureza Vickers mostraram maior dureza para a amostra laminada a frio, que juntamente com a microestrutura e potencial de pite, sugere a ocorrência da formação de martensita induzida por deformação. Após o recozimento, observou-se a diminuição da dureza para a amostra laminada a quente e a frio. O aumento da temperatura de recozimento não levou à considerável diminuição da dureza.
- ✓ Os testes de polarização cíclica potenciodinâmica mostraram diminuição do potencial de pite para a amostra laminada a frio, com posterior aumento após recozimento. As diferentes temperaturas de recozimento levaram a diferentes potenciais de pite, sendo que o recozimento a 1000°C levou à maior resistência à corrosão localizada.
- ✓ A temperatura de recozimento afetou a estrutura e composição dos filmes passivos na superfície do aço inoxidável duplex devido à mudança de composição das fases.

## Agradecimentos

Os autores agradecem a Aperam South America pelo fornecimento do material e suporte ao estudo. Também agradecem ao CNPq e a PIP/UFOP pela concessão de bolsas de IC.

## REFERÊNCIAS

- 1 Krauss, G. Steels: Processing, Structure, and Performance. 2. ed. Ohio: ASM International. 2008. 651p.
- 2 Echeverria, M. I.; Solís, E. N.; Ibáñez, J. M. H. Manual Aceros Inoxidables. Cerrillos: 2M Impresores Ltda. 2010. 72p.
- 3 Lippold, J. C.; Kotecki, D. J. Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels. New Jersey: Wiley-Interscience. 2005. 400 pp.
- 4 Lo, K. H.; Shek, C. H.; Lai, J. K.L. Recent developments in stainless steel. Materials Science and Engineering R, 2009;65(4-6):39-104.
- 5 Jinlong, L.; Tongxiang, L.; Chen, W.; Limin, D. Effect of ultrafine grain on tensile behaviour and corrosion resistance of the duplex stainless steel. Materials Science and Engineering C, 2016;62:558-563.
- 6 Sicupira, D. C.; Cardoso Junior, R.; Bracarense, A. Q.; Frankel, G. S.; Lins, V. F. C. Cyclic Polarization Study of Thick Welded Joints of Lean Duplex Stainless Steel for Application in Biodiesel Industry. Materials Research. 2017;20(1):161-167.
- 7 Chen, L.; Tan, H.; Wang, Z.; Li, J.; Jiang, Y. Influence of cooling rate on microstructure evolution and pitting corrosion resistance in the simulated heat-affected zone of 2304 duplex stainless steels. Corrosion Science. 2012;58:168-174.
- 8 Stergiou, V.; Papadimitriou, G. D. Effect of an electron beam surface treatment on the microstructure and mechanical properties of SAF 2205 joints produced with electron beam welding. Journal of Materials Science. 2011;47(5):2110-2121.
- 9 Jiang, Y.; Tan, H.; Wang, Z.; Hong, J.; Jiang, L.; Li, J. Influence of Creq/Nieq on pitting corrosion resistance and mechanical properties of UNS S32304 duplex stainless steel welded joints. Corrosion Science. 2013;70:252-259.

- 10 Tan, H.; Jiang, Y.; Deng, B.; Sun, T.; Xu, J.; Li, J. Effect of annealing temperature on the pitting corrosion resistance of super duplex stainless steel UNS S32750. *Materials Characterization*. 2009;60(9):1049-1054.
- 11 Prabhu, P.; Rajnish, G. Effect of intermetallic phases on corrosion behavior and mechanical properties of duplex stainless steel and super-duplex stainless steel. *Advanced Science Technology Research. J.* 2015;9(29):87-105.
- 12 ASTM G61-86. Standard test method for conducting cyclic potentiodynamic polarization measurements for localized corrosion susceptibility of iron-, nickel-, or cobalt-based alloys. ASTM International, 2003.
- 13 Charles, H. X. M. M.; Geraldo, L. F. Estudo das transformações de fase ferrita-austenita no resfriamento até 1050°C em um aço inoxidável duplex do tipo UNS S32304 nos estados: parcialmente e completamente ferritizados. In: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. Anais do 22º CBECimat – Matérias Metálicas. 2016, Natal, Brasil.
- 14 Malta P. O.; Alves, D. S.; Ferreira, A. O. V.; Moutinho, I. D.; Dias, C. A.P.; Santos, D. B. Static recrystallization kinetics and crystallographic texture of Nb-stabilized ferritic stainless steel based on orientation imaging microscopy. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2017;48(3):1288-1309.
- 15 Ali, S. H.; Ahmed, F. N.; Mohammed, T. A. Effect of heat treatment on corrosion behavior of duplex stainless steel in orthodontic application. *Materials Research Express*. 2017;4(12):1-24.
- 16 Alinejad, H.; Korojy, B.; Ebrahimi, G. R. Momeni, A. Microstructure and flow behavior of cast 2304 duplex stainless steel at elevated temperatures. *Journal of Materials Research*. 2016;1(24):3939-3847.
- 17 Cahn, R. W.; Haasen, P. *Physical Metallurgy*. 4 ed. Amsterdam; New York: North-Holland, 1996. v. 1, p. 1042.
- 18 Li, H.; Jiang, Z.; Li, Z. Influence of Cold Working and Grain Size on Pitting Corrosion Resistance of Ferritic Stainless Steel. *Advanced Materials Research*. 2011;(217-218):1180-1184.
- 19 Fargas, G.; Anglada, M.; Mateo, A. Effect of the annealing temperature on the mechanical properties, formability and corrosion resistance of hot-rolled duplex stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology*. 2009;209(4):1770-1782.
- 20 Aghuy, A. A.; Zakeri, M.; Moayed, M. H.; Mazinani, M. Effect of grain size on pitting corrosion of 304L austenitic stainless steel. *Corrosion Science*. 2015;94:368-376.
- 21 Atapour, M.; Dana, M. M.; Ashrafizadeh, F. A Corrosion study of grain-refined 304L stainless steels produced by the martensitic process. *International Journal of ISSI*. 2015;12(2):30-38.
- 22 M. Breda, M.; Pezzato, L.; Pizzo, M.; Calliari, I. Effect of cold rolling on pitting resistance in duplex stainless steels. *Corrosion*. 2014;1(6):15-19.
- 23 Guo, Y.; Hu, J.; Li, J.; Jiang, L.; Liu, T.; Wu, Y. Effect of Annealing Temperature on the Mechanical and Corrosion Behavior of a Newly Developed Novel Lean Duplex Stainless Steel. *Materials*. 2014;7:6604-6619.