

ESTUDO DA CORROSÃO INTERGRANULAR DA LIGA INCONEL 718 POR MEIO DA TÉCNICA DE DL-EPR MODIFICADA

Quadros, P. V. C. A.^{1,*}, Calabokis, O. P.^{1,2}, Núñez de la Rosa, Y. E.^{1,2},
Botelho, L. P. P.¹, Borges, P. C.^{1,*}

¹Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, Curitiba, Paraná, Brasil, CEP 81280-340.

²Fundación Universitaria Los Libertadores, Bogotá, Colômbia, 111221.

*Correspondência: pedroquadros@alunos.utfpr.edu.br (P. V. C. A. Q.); pborges@utfpr.edu.br (P. C. B.)

RESUMO

Tratamentos de envelhecimento são aplicados a superligas de níquel para melhorar as propriedades mecânicas, contudo, podem levar à precipitação de fases que reduzam a resistência à corrosão. Nesse trabalho, se avaliou a corrosão intergranular do Inconel 718 envelhecido (788°C por 7h) utilizando a técnica de reativação eletroquímica potenciodinâmica de ciclo duplo (DL-EPR) segundo a ISO 12732. Estudou-se o efeito do acabamento superficial e da concentração da solução (0,5~5M de H₂SO₄ + 1~2M de HCl). Observou-se uma tendência à corrosão ao redor dos precipitados de TiN e NbC presentes na microestrutura. Constatou-se maior intensidade de corrosão generalizada e por par galvânico conforme maior a concentração de H₂SO₄, e o ataque intergranular e em macla só foi verificado para o ensaio em 5M H₂SO₄. A rugosidade influenciou os testes, com exceção daqueles conduzidos em 0,5M H₂SO₄. Contudo, nenhuma das condições avaliadas pôde ser classificada como sensibilizada.

Palavras-Chave: Inconel 718; corrosão intergranular; grau de sensibilização; DL-EPR.

INTRODUÇÃO

Atualmente, a produção de petróleo e gás natural é de grande importância para a geração de energia e fabricação de produtos. Para tal, são utilizados diferentes equipamentos e estruturas localizados em alto mar, os quais ficam sujeitos a desgaste, corrosão, altas temperaturas e altas pressões (1). Nesse contexto, as superligas de níquel têm demonstrado ser uma opção apropriada, pois apresentam alta resistência à corrosão, mesmo em ambientes com elevadas temperaturas e altamente corrosivos (2,3).

A liga mais popular dentre as ligas de níquel endurecíveis por precipitação é a liga 718 (UNS N07718), mais conhecida comercialmente por Inconel 718. O endurecimento por precipitação desses materiais é pela formação de fases

secundárias por meio de tratamentos térmicos. As fases que mais contribuem para o ganho de resistência mecânica desses materiais são γ' e γ'' (4). Dentre os tratamentos térmicos usados para o endurecimento de ligas de níquel, destaca-se o envelhecimento (5).

Todavia, o aprimoramento das propriedades mecânicas das ligas de níquel através de tratamentos, sejam eles térmicos, mecânicos etc., podem, também, comprometer seu comportamento frente à corrosão. Isso ocorre em virtude da precipitação de carbonetos indesejáveis, como carbonetos de cromo ou nióbio (6). Quando se formam fases secundárias ricas em cromo, o material se torna suscetível à corrosão, pois as regiões adjacentes às fases deletérias têm o seu teor de cromo reduzido, o que instabiliza a película protetora e torna a liga sensibilizada (7).

Nesse sentido, se faz necessária a avaliação da resistência à corrosão do material a partir de técnicas eletroquímicas, dentre as quais destaca-se a técnica de reativação eletroquímica potenciodinâmica de ciclo duplo (*Double Loop Electrochemical Potentiodynamic Reactivation* - DL-EPR), a qual permite determinar o grau de sensibilização do material com base na norma ISO 12732 (2008) (8,9).

Dessa forma, observa-se a importância de avaliar a resistência à corrosão intergranular de ligas de níquel. Ainda, ressalta-se a escassez de estudos que buscam avaliar a influência dos parâmetros de entrada, como variação do eletrólito e rugosidade do material, nos resultados da técnica de DL-EPR. Assim, esse estudo teve como objetivo avaliar a suscetibilidade à corrosão intergranular do Inconel 718, solubilizado e envelhecido, através da técnica de DL-EPR, sob diferentes soluções e acabamentos superficiais.

MATERIAIS E MÉTODOS

O material utilizado para o estudo foi a liga comercial Inconel 718, a qual foi fornecida pela empresa OneSubsea, assim como utilizado em pesquisa prévia (2). O produto foi fornecido no formato de barras cilíndricas de 146mm de diâmetro, na condição industrial (solubilizadas a 1089°C por 1h e envelhecidas a 788°C por 7h). Para a confecção das amostras, as barras foram cortadas em discos cilíndricos com 5mm de espessura por eletro-erosão, e, na sequência, por jato d'água para produzir as peças de dimensões de 20 x 20 x 5mm. A composição química da liga de níquel está apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição química em porcentagem de peso da liga Inconel 718

Elemento	Ni	Cr	Fe	Nb	Mo	Ti	Al	Co
Percentual	53,45	18,28	18,81	4,94	2,83	0,93	0,5	0,23

Para a preparação metalográfica, as amostras foram lixadas com lixas de carbeto de silício (SiC) de 220 a 1200 mesh. Depois, foi feito o polimento com suspensão de diamante (1 μm), seguido de polimento com suspensão de alumina (0,05 μm Al_2O_3). Posteriormente, as peças foram limpas em banho ultrassônico com álcool etílico por 10 minutos, e secas por convecção forçada de ar quente. Seguidamente, foi realizado o ataque químico com o reagente Kalling (200ml metanol + 200ml HCl + 10g $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) por 10 segundos a fim de revelar a microestrutura. Depois, as amostras foram novamente limpas como descrito anteriormente. A microscopia ótica foi usada para análise prévia da microestrutura (BX51M da marca Olympus), através do *software* analySIS (ImagePro-Plus®).

Para detectar as fases presentes na microestrutura do Inconel 718, foi empregada a técnica de difração de raios-X (DRX) (XRD-6100 da marca Shimadzu). A técnica foi conduzida com radiação incidente Cu K- α , com comprimento de onda (λ) de 1,5418 Å, corrente de 30 mA e tensão de 40 kV. A varredura variou em uma faixa de 30 a 80° (2 θ), a uma taxa de 1°/min e passo angular igual a 0,02°. As peças submetidas à análise de DRX foram polidas conforme descrito anteriormente.

Para os ensaios de corrosão e de microdureza, foram avaliadas as superfícies após lixamento em lixa de 600 mesh (denominada condição lixada, L) e após polimento (denominada condição polida, P). As rugosidades de ambas essas condições foram medidas a partir de um perfilômetro portátil (S-100 da marca Taylor Hobson) com ponta padrão, e do *software* TalyProfile Lite 7.1. Os parâmetros para a análise foram: *cut-off* de 2,5 mm; *range* de 400 μm ; e um comprimento de avaliação de 7,5 mm.

Os valores de dureza foram obtidos via microdureza Vickers (HMV-2 da marca Shimadzu). Foram realizadas, em cada condição de superfície estudada, 15 medidas, com aplicação de uma carga de 0,05 kgf, com duração igual a 10 segundos.

Antes e após os ensaios de corrosão intergranular, foram usadas as técnicas de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia de raios-X por dispersão em energia (EDS) para caracterização das superfícies (EVO MA 15 da marca Zeiss).

Os ensaios de DL-EPR foram conduzidos em uma célula eletroquímica de acrílico, e sua montagem foi realizada assim como em outros estudos (10,11). Foi utilizado um potenciostato portátil (EmStat³⁺ da marca PalmSens), e a aquisição dos dados foi por meio do *software* PSTrace versão 5.9. Assim, os corpos de prova atuaram como eletrodo de trabalho (área exposta de 0,50265 cm²), o eletrodo de referência usado foi o de Ag/AgCl com 3 mol/L de KCl (+208~214 mV *versus* NHE) e o eletrodo auxiliar foi de grafite.

Esse estudo buscou avaliar quatro distintos eletrólitos, com dois acabamentos superficiais diferentes (lixado e polido). Cada ensaio realizado foi identificado com um código, conforme Tabela 2, para facilitar a discussão no decorrer do presente trabalho. As condições superficiais de polimento foram somente avaliadas em eletrólito de 0,5M e 1M H₂SO₄ em virtude de as concentrações de 3M e 5M H₂SO₄ serem consideradas excessivamente agressivas, impedindo análise da corrosão através da técnica de DL-EPR, conforme será discorrido no capítulo de resultados.

Tabela 2 – Código de identificação das condições estudadas da liga Inconel 718, conforme acabamento superficial e eletrólito usado no ensaio de DL-EPR

Identificação	Acabamento sup.	H ₂ SO ₄	HCl
5M L	Lixada	5 mol/L	2 mol/L
3M L	Lixada	3 mol/L	2 mol/L
1M L	Lixada	1 mol/L	2 mol/L
1M P	Polida	1 mol/L	2 mol/L
0,5M L	Lixada	0,5 mol/L	1 mol/L
0,5M P	Polida	0,5 mol/L	1 mol/L

Os parâmetros utilizados no ensaio de DL-EPR foram conforme as indicações da norma ISO 12732. O método utilizado foi a voltametria cíclica. Primeiramente, as amostras passaram por um pré-tratamento por 180s com um potencial de -0,3 V. Depois, o potencial de circuito aberto (*Open-Circuit Potential* - OCP) foi monitorado durante 300 segundos para determinar o potencial de corrosão (E_{corr}). Em seguida, o ensaio iniciou em sentido anódico a partir de um potencial igual a -0,1 V *versus* E_{corr} , até o potencial de 0,6 V *versus* Ag/AgCl. Depois, o sentido de varredura do ensaio foi invertido em sentido catódico até atingir o E_{corr} . A taxa de varredura de 1,67 mV/s.

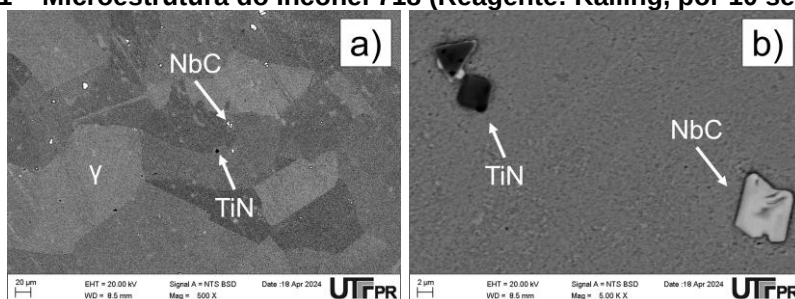
A determinação do grau de sensibilização é feita através da razão (I_r/I_p) do maior valor de corrente de reativação (I_r), durante a polarização em sentido catódico, pelo maior valor de corrente de ativação (I_p), durante a polarização anódica.

Por fim, o pH de cada uma das soluções antes dos ensaios de corrosão intergranular foram medidos via indicador de pH da marca Macherey-Nagel, e através de um pHmetro de bancada PG2000.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

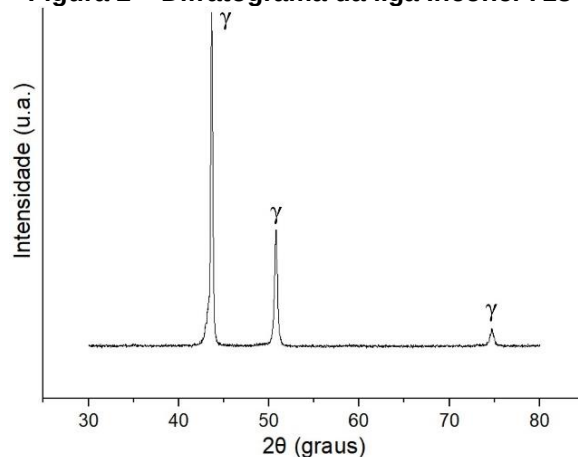
A microestrutura do Inconel 718 fornecido (solubilizado a 1089°C por 1h e envelhecido a 788°C por 7h) consistia em uma matriz de fase γ , com a presença de nitretos de titânio (TiN) e carbonetos de nióbio (NbC), conforme Figura 1. Tais resultados são corroborados por estudos que avaliaram o mesmo material (2,3).

Figura 1 – Microestrutura do Inconel 718 (Reagente: Kalling, por 10 segundos)



O difratograma apresentado na Figura 2 indica a presença da fase γ , assim como esperado para um liga de níquel, de acordo com a literatura. Resultados similares da posição dos picos da fase γ foram obtidos por autores que trabalharam com o Inconel 718 submetido aos mesmos tratamentos térmicos de solubilização e envelhecimento (2,3).

Figura 2 – Difratograma da liga Inconel 718



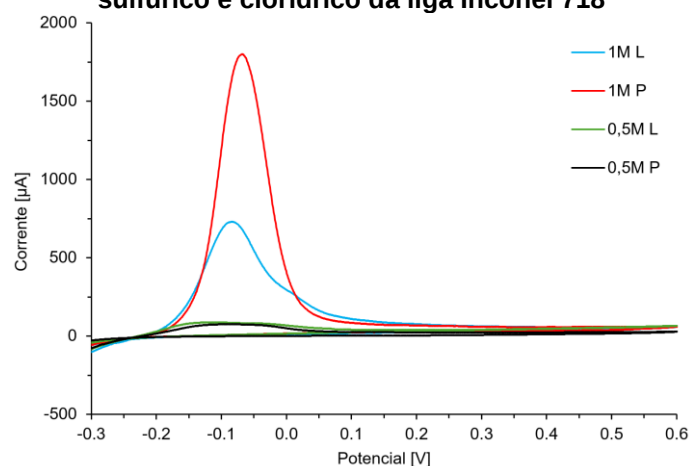
Os resultados de dureza apresentaram um valor de $400,5 \pm 15,6 \text{ HV}_{0,05}$ para as amostras com a superfície lixada, e de $398,7 \pm 15,2 \text{ HV}_{0,05}$ para as peças polidas.

Desse modo, o acabamento superficial não interferiu nas medições via microdureza Vickers. O valor de dureza médio apresentado pelo Inconel 718 do presente estudo está de acordo com os resultados apresentados em outras pesquisas que envolveram essa liga submetida ao envelhecimento (2,3).

Ambas as condições de preparação de superfície apresentaram um R_a conforme as indicações da norma ISO 12732 (2008) para a realização dos testes de DL-EPR ($R_a < 0,25\mu\text{m}$). Ainda, as duas condições, lixada e polida, apresentaram R_q similares de $0,0707 \pm 0,0154\mu\text{m}$ e $0,0650 \pm 0,0157\mu\text{m}$, respectivamente. Os parâmetros de altura (R_a , R_q) são determinados unicamente pela distribuição de alturas respeito ao plano médio da superfície. Consequentemente, as características horizontais topográficas, como as marcas de lixado, não são refletidas nesses parâmetros.

A Figura 3 retrata o gráfico das curvas dos ensaios de reativação eletroquímica potenciocinética de ciclo duplo (DL-EPR). Os testes realizados em solução de 3 e 5M $\text{H}_2\text{SO}_4 + 2\text{M HCl}$ não foram considerados para a plotagem na Figura 3, uma vez que a alta concentração dos ácidos elevou a intensidade de corrente e gerou ruído excessivo nas curvas, a ponto de não ser possível realizar a análise por meio dos gráficos. Contudo, as superfícies após os ensaios de corrosão das condições 5M L e 3M L ainda assim foram analisadas via MEV e EDS (serão apresentadas depois).

Figura 3 – Gráfico de corrente versus potencial das curvas de DL-EPR em meio de ácidos sulfúrico e clorídrico da liga Inconel 718



Primeiramente, a partir da Figura 3, observa-se que os ensaios realizados em meio de 0,5M $\text{H}_2\text{SO}_4 + 1\text{M HCl}$ resultaram em menores valores de corrente, quando comparado com os ensaios em 1M $\text{H}_2\text{SO}_4 + 2\text{M HCl}$. O mesmo foi observado estudos da literatura (11,12) que avaliaram diferentes soluções em um aço inoxidável duplex

2205. Segundo os autores, conforme maior a concentração de H_2SO_4 ou de HCl , maior foi a corrente observada nos resultados de DL-EPR. Além disso, nota-se que, para as duas condições, 0,5M L e 0,5M P, a corrente apresentou intensidades semelhantes, indicando que a rugosidade apresentou pouca influência nos ensaios em meio de 0,5M H_2SO_4 + 1M HCl .

Quanto aos ensaios conduzidos em 1M H_2SO_4 + 2M HCl , a preparação da superfície se demonstrou significativa para esses testes, de modo que a condição polida apresentou uma corrente maior, com relação à superfície lixada, o que vai contra o que se espera de acordo com a literatura, em particular para ensaios de polarização cíclica (13). Todavia, o mesmo comportamento já foi observado, em outros estudos (14), onde um aço inoxidável superduplex 2750, com uma superfície polida, apresentou maior densidade de corrente frente à corrosão por fresta, em comparação com uma superfície lixada. Contudo, o autor (14) também reportou que o acabamento superficial de lixamento (600 mesh) se mostrou menos resistente à corrosão generalizada e por pites, quando comparado às amostras polidas. Assim, infere-se que o acabamento superficial pode ter uma influência diferente para cada tipo de corrosão sendo avaliada.

Adicionalmente, visualiza-se, a partir das quatro curvas presentes na Figura 3, que nenhuma delas exibiu um pico de corrente de reativação (I_r). Desse modo, de acordo com a norma ISO 12732, nenhuma delas é classificada como sensitizada, dado que a razão I_r/I_p tende a zero, em virtude de que o valor do pico de reativação também tende a zero.

Um estudo avaliou a liga Inconel 600 através da técnica de DL-EPR, variando a concentração de H_2SO_4 no eletrólito utilizado nos testes, e os tratamentos térmicos de envelhecimento (550~650 °C com duração de 1~100h) (15). De acordo com os resultados dos autores, o ranqueamento de materiais a partir de sua resistência à corrosão intergranular, ou grau de sensitização (DOS), pode ser feito a partir da técnica de DL-EPR, desde que se tenha um eletrólito sensível o suficiente para que seja capaz de fazê-lo. Ao longo do estudo, os pesquisadores encontraram soluções as quais não foram sensíveis para a determinação do DOS, ao mesmo tempo que outras foram agressivas demais, impedindo a análise das amostras.

Nesse contexto, entende-se que, para o presente trabalho, as soluções de 3M e 5M H_2SO_4 + 2M HCl foram consideradas agressivas demais para a avaliação da sensitização da liga Inconel 718, do mesmo modo que as soluções de 1M H_2SO_4 +

2M HCl e 0,5M H₂SO₄ + 1M HCl foram consideradas pouco sensíveis para a análise da corrosão intergranular do material em estado de fornecimento. Ainda, nenhum eletrólito estudado permitiu o ranqueamento do material a partir da determinação do grau de sensibilização (DOS) do Inconel 718 conforme recebido.

A Tabela 3 apresenta os valores obtidos de pH das soluções usadas nos testes de DL-EPR por meio do uso do pHmetro de bancada. Os papéis indicadores de pH não chegaram a um resultado conclusivo, desse modo, foram descartados.

Tabela 3 – Valores de pH das soluções de H₂SO₄ + HCl usadas para os ensaios de DL-EPR

Eletrólito	Condições ensaiadas	pH
0,5M H ₂ SO ₄ + 1M HCl	0,5M L e 0,5M P	-0,65 ± 0,04
1M H ₂ SO ₄ + 2M HCl	1M L e 1M P	-1,03 ± 0,08
3M H ₂ SO ₄ + 2M HCl	3M L	-1,49 ± 0,04
5M H ₂ SO ₄ + 2M HCl	5M L	-1,99 ± 0,02

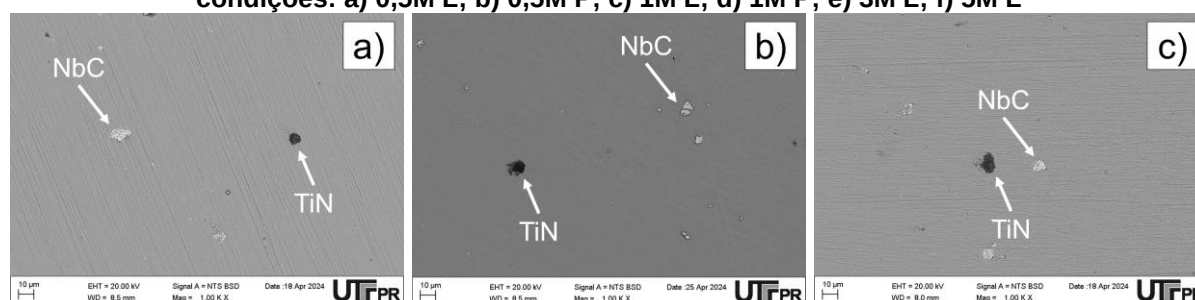
Observa-se, por meio dos valores de pH da Tabela 3, que, conforme maior a concentração de H₂SO₄ ou de HCl no eletrólito, menor o pH, indicando maior a acidez da solução. Tal fato corrobora com as maiores correntes indicadas pela Figura 3 para as condições 1M L e 1M P, e com os resultados obtidos em outros estudos (11,12). Ainda, todos os valores de pH medidos foram negativos, o que pode ocorrer de acordo com a literatura (16).

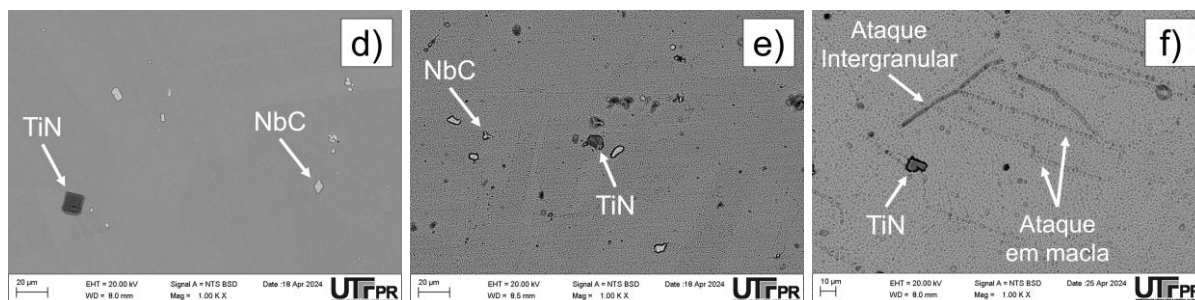
Por fim, a Figura 4 apresenta as micrografias obtidas por MEV das amostras após testes de DL-EPR, apresentando a corrosão generalizada, localizada e os precipitados encontrados. A composição química dos nitretos de titânio (TiN) e carbonetos de nióbio (NbC) podem ser observados na Tabela 4.

Tabela 4 – Composição química em porcentagem de peso dos precipitados de nitreto de titânio (TiN) e carboneto de nióbio (NbC) da liga Inconel 718

Elemento	C	N	Ti	Nb
TiN	1,00 ± 2,63	20,63 ± 3,16	60,07 ± 4,04	15,23 ± 2,32
NbC	20,60 ± 2,41	-	4,91 ± 1,50	69,22 ± 2,82

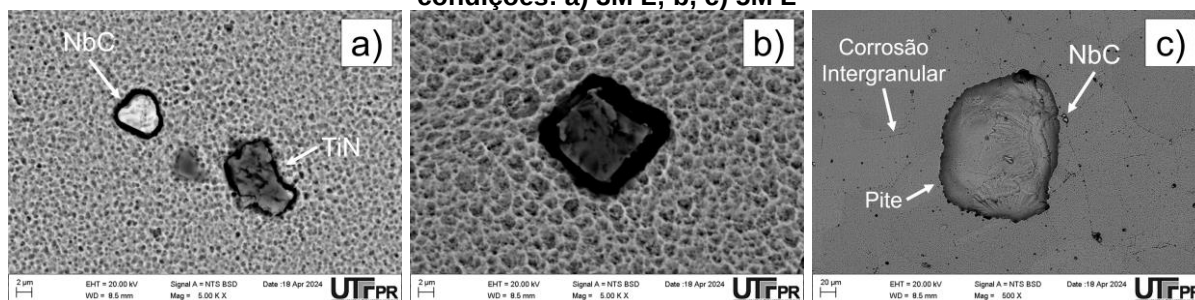
Figura 4 – Micrografias, obtidas por MEV, da liga Inconel 718 após ensaio de DL-EPR nas condições: a) 0,5M L; b) 0,5M P; c) 1M L; d) 1M P; e) 3M L; f) 5M L





Os resultados da Tabela 4 confirmam a presença de precipitados de nitretos de titânio (TiN) e carbonetos de nióbio (NbC). Quanto às Figura 4 (0,5 M L e 0,5M P, respectivamente), não é possível observar corrosão intergranular, independente da preparação metalográfica, o que corrobora com as curvas dessas condições vistas na Figura 3. Contudo, apesar de terem apresentado uma maior corrente em comparação com condições submetidas aos testes de DL-EPR em solução de 0,5M H_2SO_4 + 1M HCl, as condições 1M L e 1M P (Figura 4) também não exibiram corrosão localizada. A principal diferença notada entre as amostras lixadas e polidas foi que o polimento facilitou a visualização dos precipitados. A Figura 5 dará um foco para as condições submetidas aos ensaios a 3M e 5M H_2SO_4 + 2M HCl, para avaliação da corrosão localizada observada.

Figura 5 – Micrografias, obtidas por MEV, da liga Inconel 718 após ensaio de DL-EPR nas condições: a) 3M L; b, c) 5M L



A Figura 5, bem como a Figura 4, é referente ao Inconel 718 lixado submetido aos ensaios de DL-EPR em meio de 3M H_2SO_4 + 2M HCl. A partir das micrografias, verifica-se indícios de ataque intergranular, uma intensa corrosão generalizada em toda a superfície do material, além de corrosão galvânica ao redor dos precipitados (Figura 5). A ocorrência de corrosão por micro-pares galvânicos ao redor de precipitados como carbonetos ou nitretos de titânio/nióbio também foi observada em um estudo que avaliou um aço austenítico 304 (17).

A superfície das amostras lixadas ensaiadas em solução de 5M H_2SO_4 + 2M HCl pode ser vista nas Figura 4, Figura 5. Nessa condição, pode-se identificar ataque

nos contornos de grãos da fase γ e nos contornos de macla (Figura 4). Contudo, os ensaios de DL-EPR não indicaram corrosão intergranular. Observou-se, também, intensa corrosão generalizada, bem como corrosão por par galvânico (Figura 5), similar ao descrito para a condição 3M L. Por último, identificou-se a presença de pites (Figura 5) para essa condição. A ocorrência de pites durante a ensaio de DL-EPR também foi observada por um estudo que avaliou o aço martensítico 420 (10).

CONCLUSÕES

A partir do presente estudo, é possível inferir que, quanto maiores foram as concentrações dos ácidos sulfúrico e clorídrico utilizados no eletrólito de ensaio, maior foi a intensidade da corrosão indicada pelo teste de DL-EPR.

Além disso, as soluções de 3M e 5M H_2SO_4 + 2M HCl não permitiram a análise de corrosão intergranular do Inconel 718 solubilizado e envelhecido, por serem ácidas demais, causando excesso de corrosão. Enquanto as soluções de 1M H_2SO_4 + 2M HCl e 0,5M H_2SO_4 + 1M HCl foram pouco sensíveis à sensitização do material, o que impediu a determinação do grau de sensitização (DOS) da liga estudada.

Ainda, foi observado que, após ensaios de DL-EPR, as soluções de 3M e 5M H_2SO_4 + 2M HCl levaram à corrosão generalizada, início de corrosão intergranular nos contornos de grãos e de macla, e corrosão galvânica ao redor dos precipitados de TiN e NbC. Após DL-EPR em solução de 5M H_2SO_4 , também foi identificada a nucleação de pites.

Por fim, a preparação de superfície afetou apenas a densidade de corrente de ativação (I_p) para a concentração de 1M H_2SO_4 + 2M HCl. Adicionalmente, apesar de os gráficos de DL-EPR exibirem maior corrente de corrosão para a condição 1M P, com relação às outras três, 0,5M L; 0,5M P e 1M L, a caracterização por MEV apontou diferenças insignificantes na corrosão dessas quatro superfícies. Contudo, o polimento permitiu melhor análise visual dos precipitados e da superfícies em geral.

Finalmente, nenhuma das condições avaliadas (tanto quanto sua rugosidade, como quanto a concentração dos ácidos no eletrólito) apresentou pico de reativação, indicando ausência de sensitização para o material.

AGRADECIMENTOS

Os agradecimentos são direcionados ao apoio financeiro da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), à empresa OneSubsea pela concessão do material de estudo e ao Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais (CMCM) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

REFERÊNCIAS

- (1) BAI, Y.; BAI, Q. Subsea Engineering Handbook. 1. ed. Houston: Elsevier, 2010.
- (2) NÚÑEZ DE LA ROSA, Y.; *et al.* Assessment of the pitting, crevice corrosion, and mechanical properties of low-temperature plasma-nitrided Inconel alloy 718. *Metals*, v. 13, p. 1172, jun. 2023. doi: 10.3390/met13071172
- (3) OIKAVA, Y. I.; *et al.* The effect of counterbody material on tribological behavior of active screen plasma-nitrided Inconel 718 under saline solution. *Tribology Letters*, v. 71, p. 116, set. 2023. doi: 10.1007/s11249-023-01788-3
- (4) DUPONT, J. N.; LIPPOLD, J. C.; KISER, S. D. Welding metallurgy and weldability of nickel-base alloys. New Jersey: Wiley, 2009.
- (5) CANDIOTO, K. C. G.; *et al.* Characterization of the superalloy Inconel 718 after double aging heat treatment. *Mechanical and Materials Engineering of Modern Structure and Component Design, Advanced Structured Materials*, v. 70, p. 293-300, 2015. doi: 10.1007/978-3-319-19443-1_24
- (6) MARTIN, U.; *et al.* Evaluation of the dos by DL-EPR of UNSM processed Inconel 718. *Metals*, v. 10, n. 2, p. 204, fev. 2020. doi: 10.3390/met10020204
- (7) LEIVA-GARCÍA, R.; *et al.* Study of the sensitisation process of a duplex stainless steel (UNS 1.4462) by means of confocal microscopy and localised electrochemical techniques. *Corrosion Science*, v. 94, p. 327–341, mai. 2015. doi: 10.1016/j.corsci.2015.02.016
- (8) ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION. NF EN ISO 12732: Electrochemical potentiokinetic reactivation measurement using the double loop method (based on Cihal's method). AFNOR, 2008.
- (9) ČÍHAL, V. A potentiokinetic reactivation method for predicting the I.C.C. and I.G.S.C.C. sensitivity of stainless steels and alloys. *Corrosion Science*, v. 20, n. 6, p. 737–744, jan. 1980. doi: 10.1016/0010-938X(80)90054-2
- (10) QUADROS, P. V. C. A.; BERTON, E. M.; BORGES, P. C. Avaliação da sensitização e dureza do aço inoxidável martensítico AISI 420 tratado por têmpera e revenido. In: XX CONEMI, 2021. Anais do Congresso Internacional de Engenharia Mecânica e Industrial. Brasília: FENEMI, 2020. doi: 10.29327/conemi.288744
- (11) RIBEIRO, J. J. K. Efeito de tratamentos isotérmicos no comportamento em corrosão, tribologia e tribocorrosão do aço inoxidável duplex UNS S32205. 2023. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica e de Materiais) – Programa de Pós-Graduação

em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2023.

(12) LO, I. H.; et al. Effect of electrolyte composition on the active-to-passive transition behavior of 2205 duplex stainless steel in H₂SO₄/HCl solutions. *Corrosion Science*, v. 48, p. 696–708, mar. 2006. doi: 10.1016/j.corsci.2005.02.004

(13) ESMAILZADEH, S.; ALIOFKHAZRAEI, M.; SARLAK, H. Interpretation of cyclic potentiodynamic polarization test results for study of corrosion behavior of metals: a review. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, v. 54, n. 5, p. 976-989, 2018. doi: 10.1134/S207020511805026X

(14) ALVEAR, C. A. N. Efecto del acabado superficial del acero súper dúplex UNS S32750 en el comportamiento frente a la corrosión general y localizada. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Faculdade de Ciências e Engenharia, Universidad del Sinú, Montería, 2023.

(15) MADAY, M. F.; CASACCIA, C. R. E.; VITTORI, M. The application of the electrochemical potentiokinetic reactivation method for detecting sensitization in Inconel 600: the influence of some testing parameters. *Corrosion Science*, v. 28, n. 9, p. 887-900, 1988. doi: 10.1016/0010-938X(88)90037-6

(16) LIM, K. F. Negative pH does exist. *Journal of Chemical Education*, v. 83, n. 10, p. 1465, 2006. doi: 10.1021/ed083p1465

(17) ZHANG, H. F.; et al. Mechanical properties and corrosion resistance of laser cladding iron-based coatings with two types of NbC reinforcement. *Surface & Coatings Technology*, v. 479, p. 130558, 2024. doi: 10.1016/j.surfcoat.2024.130558

STUDY OF INTERGRANULAR CORROSION OF INCONEL 718 ALLOY USING MODIFIED DL-EPR TECHNIQUE

Aging treatments are applied to nickel superalloys to improve its mechanical properties. However, they can lead to the precipitation of phases that reduce corrosion resistance. In this work, the intergranular corrosion of aged Inconel 718 (788°C for 7h) was evaluated using the double loop potentiokinetic electrochemical reactivation (DL-EPR) technique according to ISO 12732. The effect of surface roughness and concentration of the solution (0.5~5M H₂SO₄ + 1~2M HCl) was studied. A tendency to corrosion was observed around the TiN and NbC precipitates present in the microstructure. A higher intensity of generalized corrosion and galvanic corrosion was found as the concentration of H₂SO₄ increased, and intergranular corrosion was only verified for the test in 5M H₂SO₄. Roughness influenced the tests, except for those performed in 0.5M H₂SO₄. However, none of the conditions evaluated could be classified as sensitized.

Keywords: Inconel 718; intergranular corrosion; degree of sensitization; DL-EPR.