EFEITO DE TRATAMENTOS ISOTÉRMICOS NA RESISTÊNCIA A TRIBOCORROSÃO DO AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX UNS S32205

Jomar José Knaip Ribeiro [1] (jomarribeiro@alunos.utfpr.edu.br), Thomas Markus Zeller (zeller@alunos.utfpr.edu.br)[2], Vinícius Melo Canestraro [3] (vinitraro@gmail.com), Heloisa Colli Moreira [4] (hmoreira@alunos.utfpr.edu.br), Paulo César Borges [5] (pborges@utfpr.edu.br)

(1) Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR); Departamento Acadêmico da Mecânica

RESUMO: *Os aços inoxidáveis duplex possuem excelentes propriedades mecânicas combinadas a alta resistência à corrosão. Entretanto, ciclos térmicos inadequados podem induzir precipitações de fases intermetálicas como sigma e chi, que podem prejudicar as propriedades mecânicas e de corrosão. Nesse sentido, o presente artigo tem como objetivo avaliar a tribocorrosão em duas condições de tratamento térmico distintas: envelhecidas na temperatura com maior cinética de precipitação da fase sigma (850°C), bem como em condição solubilizada (1000°C) com ausência de fases deletérias. O material utilizado foi o UNS S32205 submetido ao encharque de 30 minutos seguido de resfriamento em água. Foram realizados ensaios eletroquímicos concomitantemente ao desgaste (Resistência a Polarização Linear (RPL) e Potencial de Circuito aberto (PCA)). No ensaio de Potencial de Circuito aberto (PCA) foi observado o deslocamento catódico com a solicitação mecânica, sendo que a intensidade desse deslocamento foi associada ao volume perdido do material. Observou-se a redução do RPL para ambas condições em desgaste, inferindo uma superfície mais ativa para corrosão. Ademais, a precipitação da fase sigma induziu aumento de dureza e superior resistência ao desgaste e menores valores de COF. Os resultados indicam maior influência da dureza da superfície na resistência a tribocorrosão do material em condição de PCA.*

PALAVRAS-CHAVE: *TRIBOCORROSÃO, SIGMA, DUPLEX.*

EFFECT OF ISOTHERMAL TREATMENTS ON TRIBOCORROSION RESISTANCE OF UNS S32205 DUPLEX STAINLESS STEEL

ABSTRACT: *Duplex stainless steels exhibit excellent mechanical properties combined with high corrosion resistance. However, inadequate thermal cycles can induce the precipitation of intermetallic phases such as sigma and chi, which can compromise both mechanical and corrosion properties. In this context, the present article aims to evaluate tribocorrosion under two different heat treatment conditions: aging at the temperature with the highest precipitation kinetics of the sigma phase (850°C), as well as in a solubilized condition (1000°C) with the absence of deleterious phases. The material used was UNS S32205 subjected to 30 minutes of soaking followed by water cooling. Electrochemical tests were conducted simultaneously with wear (Linear Polarization Resistance (LPR) and Open Circuit Potential (OCP)). In the Open Circuit Potential (OCP) test, cathodic shift was observed with mechanical loading, and the magnitude of this shift was associated with the material's lost volume. A reduction in Linear Polarization Resistance was observed for both wear conditions, indicating a more active surface for corrosion. Furthermore, the precipitation of the sigma phase led to increased hardness and superior wear resistance, as well as lower COF values. The results suggest a greater influence of surface hardness on the tribocorrosion resistance of the material under OCP condition.*

KEYWORDS: *TRIBOCORROSION, SIGMA, DUPLEX.*

1. INTRODUÇÃO

A tribocorrosão consiste na ação combinada de cargas mecânicas e corrosivas, que por meio das suas interações, podem promover a intensificação das taxas de degradação das superfícies metálicas(DIOMIDIS *et al.*, 2010; LÓPEZ-ORTEGA; ARANA; BAYÓN, 2018; SUN; HARUMAN, 2011). Em aços inoxidáveis, esses eventos, podem promover a remoção do filme passivo, com a consequente dissolução acelerada do metal (ESPALLARGAS *et al.*, 2013; GAO *et al.*, 2019) . A avaliação da sinergia nesses sistemas, tem papel tecnológico importante e a sua ocorrência é notória em diversos campos da indústria, como em equipamentos offshore, mineração, geração de energia, biomedicina e no processamento de alimentos (SUN; HARUMAN, 2011).

Nesse contexto, destaca-se a ampla aplicação dos aços inoxidáveis duplex em ambientes sujeitos a eventos corrosivos e de desgaste, devido a sua excelente resistência à corrosão localizada e propriedades mecânicas (GAO *et al.*, 2019). Contudo, quando esses materiais são submetidos a altas temperaturas, soldagem ou tratamento térmico inadequado, pode ocorrer a precipitação da fase sigma (σ), que pode afetar as propriedades de corrosão e desgaste do material. A fase σ, com cinética de formação rápida entre 600 e 1000 °C, tem despertado o interesse dos pesquisadores, uma vez que, em pequenas proporções, pode diminuir a tenacidade, ductilidade e resistência à corrosão localizada em soluções contendo cloretos (BADJI *et al.*, 2008; FARGAS; MESTRA; MATEO, 2013).

Diversos estudos analisaram a influência da fase σ no desempenho em macro-wear e micro-wear (DAVANAGERI, M. B. *et al.*, 2015; FARGAS; MESTRA; MATEO, 2013; KHAN; CHHIBBER, 2020; RIBEIRO *et al.*, 2023; SHOCKLEY; HORTON; WAHL, 2017a). Davanageri *et al*. (2017) demonstraram que a resistência ao desgaste à seco (pin-on-disk) do DSS S32750 foi aprimorada aumentando a fração de volume da fase sigma (11, 15 e 30%). A dureza introduzida pela precipitação da fase sigma reduziu *ploughing*, e a deformação plástica resultou em diminuição da perda de material e também, menor coeficiente de atrito (DAVANAGERI, M.; NARENDRANATH; KADOLI, 2017). Ribeiro *et al*. (2023) realizando ensaios em nano-freeting, evidenciaram em condições envelhecidas que a fase σ apresentam uma maior resistência ao desgaste e baixos valores de CoF devido ao mecanismo de endurecimento por precipitação. O desgaste localizado nos grãos da fase σ foi menos pronunciado do que nos grãos de ferrita e austenita.

Em relação a avaliação da tribocorrosão no aço duplex com precipitação de fases deletérias, até o momento, foi identificado somente o estudo de Shockley *et al*. (2017) (SHOCKLEY; HORTON; WAHL, 2017a). Os autores avaliaram a influência das fases secundárias induzidas pelo tratamento de envelhecimento na tribocorrosão no aço inoxidável superduplex UNS S32750 tratado em 800°C por 10, 30 e 60 min (100 e 600 mV vs SCE), contudo, não avaliaram simultaneamente a variação do potencial durante o desgaste em PCA. Nesse sentido, o presente estudo tem como objetivo avaliar o

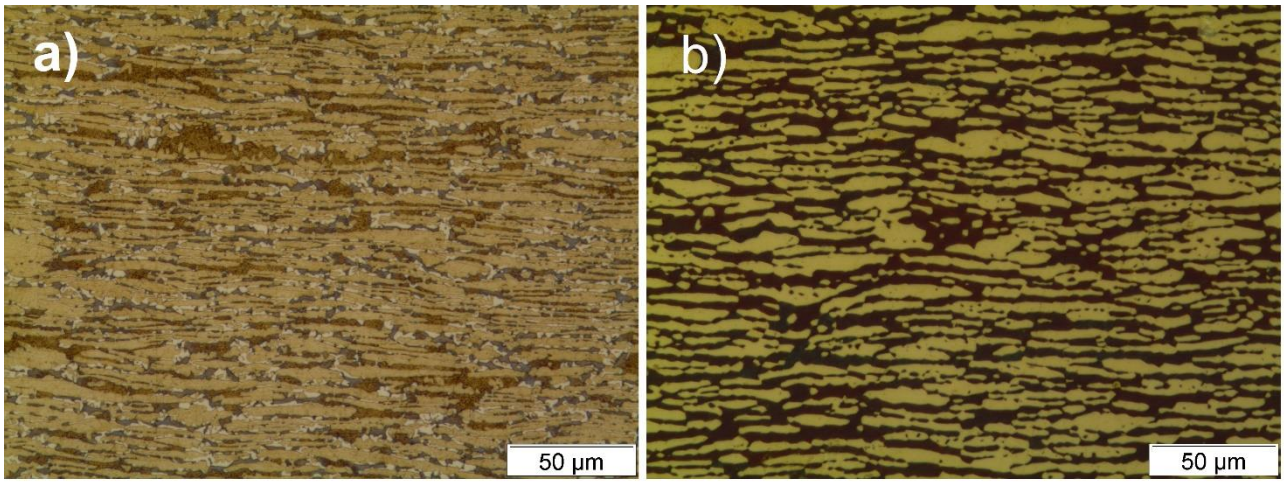
desempenho tribocorrosivo do aço duplex UNS S32205 submetido aos tratamentos de envelhecimento e solubilização, por meio dos ensaios de deslizamento recíproco em solução de 0,5M de NaCl sob monitoramento eletroquímico por meio das técnicas de resistência a polarização linear (RPL) e Potencial de Circuito Aberto (PCA).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Tratamentos Térmicos e preparação das amostras

Os tratamentos térmicos no aço duplex UNS S32205 foram conduzidos no Centro de Pesquisa da Aperam South America, a partir de um forno tipo mufla do modelo Combustol, com uma atmosfera controlada de nitrogênio. Maiores detalhes sobre os materiais, procedimentos e parâmetros adotados encontram-se em Turin et al. (2023) e Ribeiro et al. (2023). As condições empregadas no presente trabalho compreendem as amostras envelhecidas com maior cinética de precipitação para a fase sigma e maior dureza (850 °C) e solubilizadas a 1000°C em tratamentos com duração de 30 minutos e seguidos de resfriamento em água. Na Figura 1 encontra-se as microestruturas obtidas para a condição a 850°C (a) e 1000°C (b), atacadas com reagente Behara modificado e Behara, respectivamente (Turin *et al*, 2023).

FIGURA 1. Microestrutura na seção longitudinal das condições de 850°C (a) e 1000°C (b). Imagens em ampliações de 500x.



Fonte: Autor.

Após os tratamentos térmicos, houve a preparação dos corpos de prova no sentido normal da chapa a partir do seccionamento com jato de água de peças retangulares com dimensões de 25x20 mm e posteriormente lixamento com lixas de carbeto de silício (SiC) com granulometrias de P220, P320, P400, P600 e P1200, seguidos da etapa de polimento, realizado em uma politriz automática Buehler, com suspensão de alumina de 1 µm.

2.2. Ensaios de Tribocorrosão

Os testes de tribocorrosão foram conduzidos na configuração de contato esfera contra plano em movimento deslizante do tipo recíproco. Esses experimentos foram realizados por meio de uma célula eletroquímica desenvolvida pelo Laboratório de Corrosão (LabCorr) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), especialmente concebida para integração no tribômetro modelo UMT Multi-Specimen Test System da CETR. Para simular as condições de teste, esferas de nitreto de silício (Si_3N_4) com um diâmetro de 10 mm foram empregadas como contracorpos, enquanto uma carga normal de 5 N foi aplicada e amplitude de deslizamento de 4 mm. A tensão cisalhante máxima desenvolvida no contato estático, calculada a partir das equações de Hertz para o material, foi estimada em 272 MPa.

A avaliação do comportamento eletroquímico das superfícies investigadas, sob condições de deslizamento e repouso, adotou-se duas técnicas principais: Potencial de Circuito Aberto (PCA) e Resistência à Polarização Linear (RPL). Tais técnicas foram implementadas por meio do potenciostato portátil EmStat 3+ (PalmSens). A configuração de célula eletroquímica adotada consistiu em três eletrodos distintos: um eletrodo de referência (ER), neste caso, um eletrodo Ag/AgCl saturado em KCl (Ag/AgCl sat.) E^0 = + 200 mV; um eletrodo de trabalho (a própria amostra em teste); e um contraeletrodo de grafite. Além disso, um tubo de Luggin foi empregado para posicionar o eletrodo de referência de forma a se aproximar da região de deslizamento. A solução adotada em todos os testes foi de 0,5 M de NaCl.

Os procedimentos experimentais adotados para análise concomitante entre corrosão e desgaste mecânico foram baseados no ensaio contínuo descrito por Possoli (2020). Esse procedimento, baseia-se na análise contínua do Potencial de Circuito Aberto, seguido de medidas de RPL distintas em relação ao momento de análise durante o ensaio, em que RPL0 consiste no teste sem deslizamento; RPL1, representando o primeiro teste com deslizamento; RPL2, denotando o segundo teste com deslizamento; e assim por diante. Paralelamente às abordagens eletroquímicas, a variação do coeficiente de atrito (COF) foi simultaneamente monitorada nos instantes de ocorrência do movimento deslizante.

Após a primeira medição de RPL (RPLO), inicia-se a primeira série de deslizamentos (400 ciclos) e posterior período de recuperação (sem desgaste) por 10 minutos. Em seguida é realizada a segunda série de deslizamento (5600 ciclos), em que foi realizado o ensaio de RPL a cada 5 minutos. Por fim o potencial é monitorado por 10 minutos. O volume perdido total na pista de deslizamento após os ensaios foi avaliado utilizando o interferômetro ótico confocal TalySurf CCI Lite, da Taylor Hobson.

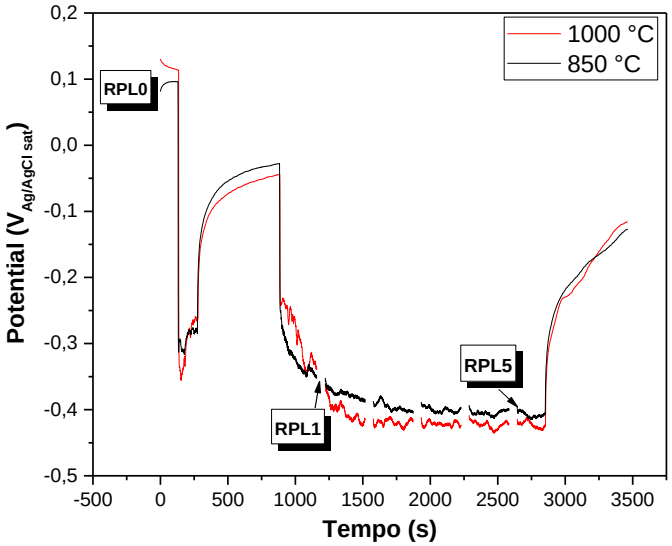
3. RESULTADOS

3.1. Efeito da solicitação mecânica no potencial de circuito aberto

Por meio da Figura 2, verifica-se com a solicitação mecânica, que o potencial de circuito aberto (PCA) do UNS S32205 desloca rapidamente para a direção negativa associado a remoção periódica do filme passivo, um fenômeno característico observado na tribocorrosão de metais passivos (LANDOLT; MISCHLER; STEMP, 2001; MISCHLER, 2008; VIEIRA *et al.*, 2012). Esse deslocamento no sentido catódico pode ser explicado pelo acoplamento galvânico estabelecido entre as áreas mecanicamente despassivadas (ânodo) e as áreas passivas circundantes (cátodo) (VIEIRA *et al.*, 2012).

Além disso, evidencia-se que a magnitude do deslocamento catódico é dependente da condição em estudo, revelando maiores valores na condição de 1000° C. Esses resultados foram identificados em estudos anteriores, como relatado por Possoli (2020), sendo que em condições com menor volume desgastado, houve um menor deslocamento catódico. Essas diferenças observadas podem ser atribuídas a diversos fatores, como a relação entre as áreas correspondentes às regiões desgastadas e não desgastadas, que na condição de 850°C, devido aos menores valores em perda de volume, a relação entre essas áreas é menor e por consequência ocorre um deslocamento catódico menos acentuado para essa condição.

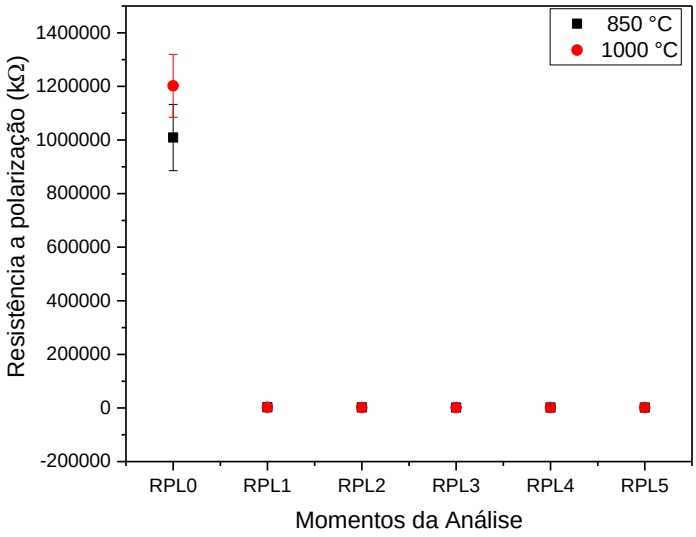
FIGURA 2. Evolução do potencial em relação ao tempo de ensaio de tribocorrosão para as condições de 850 e 1000°C.



Fonte: Autor.

Ademais, os valores de resistência a polarização foram calculados em seis momentos conforme evidenciado na Figura 3. É possível verificar que, a partir do início do deslizamento, ambas as condições de estudo exibiram uma redução na resistência à polarização linear, atribuída ao dano ao filme passivo, sugerindo uma aceleração do processo corrosivo. Os valores de resistência à polarização nos períodos em deslizamento (RPL1 à RPL5) mantiveram-se relativamente constantes. Tais resultados foram semelhantes aos obtidos para a condição de fornecimento do UNS S32750 no trabalho de Possoli (2020). Enquanto, para o RPL0, observou-se menores valores em 850°C, o que pode estar associado a precipitação da fase deletéria.

FIGURA 3. Resistência à polarização linear em função dos momentos de análise do ensaio de tribocorrosão para as condições de 850 e 1000°C.



Fonte: Autor.

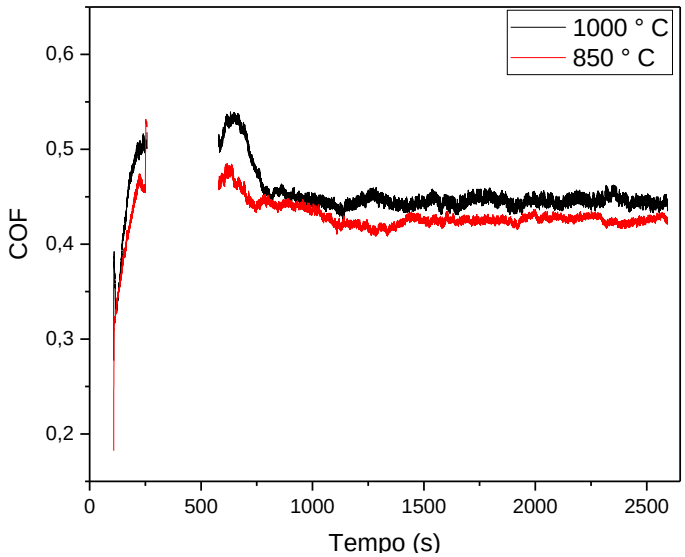
3.1. Efeito dos tratamentos térmicos no coeficiente de atrito e volume perdido do material.

No decorrer do experimento de tribocorrosão, avaliou-se a variação do coeficiente de atrito (COF). A Figura 4 ilustra a evolução do COF ao longo do tempo para as duas condições analisadas. Em ambas as curvas, é possível observar a transição de um estágio de *running-in*, caracterizado pelo contato entre a esfera e a superfície da amostra, para um regime subsequente de *steady state*. No período de running-in ocorrem alterações significativas nas taxas de desgaste, após o início do contato entre as superfícies sólidas não desgastadas, tais alterações podem estar associadas com a modificação da rugosidade superficial, composição da superfície, microestrutura, distribuição do terceiro corpo, dentre outros fatores (BLAU, 2005). Enquanto no regime de *steady-state*, trata-se do período que o tribossistema apresenta coeficiente de atrito em níveis relativamente constantes.

A condição de 850°C, induz um aumento na dureza dos materiais, o que, por sua vez, leva a uma redução no coeficiente de atrito. Em relação aos testes de reciprocating, na literatura quando

realizados com uma força constante de 10 N e uma amplitude de 5 mm, Maamache *et al*. (2021) observaram diferenças nos mecanismos de desgaste e na evolução do coeficiente de atrito, dependendo da temperatura de tratamento do material UNS S32750. Em condições sem a presença de fases prejudiciais (1050ºC, 1200ºC), foram identificados mecanismos de desgaste predominantemente abrasivos, com um aumento contínuo do coeficiente de atrito. Ribeiro et al. (2023), obteve menores valores de COF nas condições com a presença da fase sigma na microestrutura.

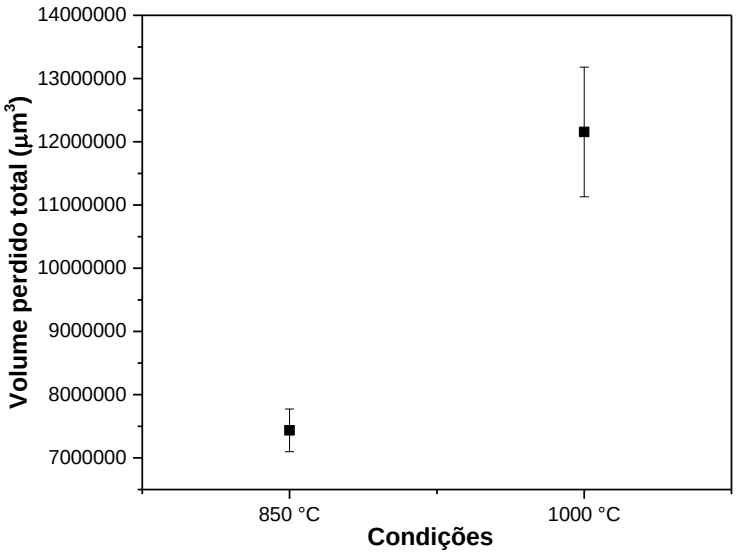
FIGURA 4. Evolução do coeficiente de atrito (COF) ao longo do ensaio de tribocorrosão para as condições de 850 e 1000°C.



Fonte: Autor.

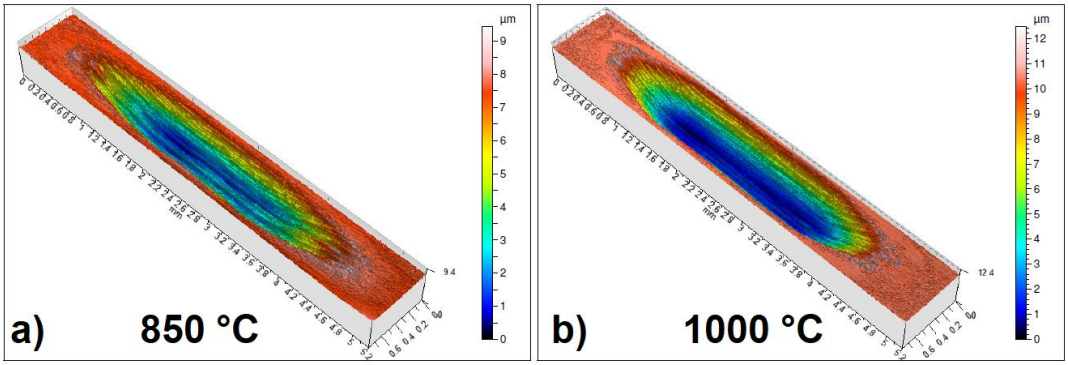
Por meio da Figura 5, observa-se o melhor desempenho em tribocorrosão (menor volume perdido) na condição em 850°C. Diversos trabalhos têm evidenciado que a dureza introduzida pela precipitação da fase sigma aumenta a resistência ao desgaste durante ensaios tribológicos macroscópicos (DAVANAGERI, M. B.; NARENDRANATH; KADOLI, 2017; DEL ABRA-ARZOLA *et al.*, 2018; FARGAS; MESTRA; MATEO, 2013; MAAMACHE *et al.*, 2021; WANG *et al.*, 2019). Esse comportamento pode ser explicado pela alta dureza induzida pelos precipitados da fase, que fortalecem a superfície e melhoram sua resistência contra as tensões causadas pelos componentes do tribossistema (DAVANAGERI, M. B. *et al.*, 2015). Na Figura 6, tem-se uma projeção tridimensional das pistas de deslizamento para a condição de 850°C (a) e 1000°C (b). As durezas obtidas em 850°C foi de 333 ± 15 $HV_{0,5}$ e 1000°C 240 ± 13 $HV_{0,5}$ (RIBEIRO *et al.*, 2023).

FIGURA 5. Volume perdido após os 6000 ciclos nos ensaios de tribocorrosão para as condições de 850 e 1000°C.



Fonte: Autor.

FIGURA 6. Projeção axonométrica para os ensaios de tribocorrosão em meio de NaCl 0,5 M na condição de 850 (a) e 1000°C (b).



Fonte: Autor.

4. CONCLUSÕES

Neste estudo, foram investigados os efeitos de distintos tratamentos térmicos de envelhecimento e solubilização nas propriedades de tribocorrosão do aço duplex UNS S32205. As principais conclusões que podem ser tiradas são as seguintes:

- A remoção da camada passiva de óxidos devido aos efeitos mecânicos proporcionou um deslocamento catódico no potencial dos materiais. Esse deslocamento catódico foi maior na condição de 1000°C, associando a uma perda maior de volume dessa condição, podendo ser associado ao menor dano da pista de deslizamento e menor diferença entre o potencial da pista e da vizinhança;

- A RPL antes do período de deslizamento foi superior na condição solubilizada, indicando o pior desempenho em corrosão na 850°C devido a precipitação da fase sigma.
- A RPL em condição de desgaste foi reduzida em ambas as condições em desgaste.
- A condição envelhecida (850°C) exibiu melhor desempenho em tribocorrosão, com menores valores de volume perdido e COF. Esse comportamento pode estar associado aos valores superiores de dureza para essa condição.

REFERÊNCIAS

BADJI, R. et al. Phase transformation and mechanical behavior in annealed 2205 duplex stainless steel welds. Materials Characterization, v. 59, n. 4, p. 447–453, 2008.

BLAU, P. J. On the nature of running-in. Tribology International, v. 38, n. 11- 12 SPEC. ISS., p. 1007–1012, 2005.

DAVANAGERI, M. B. et al. Influence of heat treatment on microstructure, hardness and wear behavior of super duplex stainless steel AISI 2507. American Journal of Materials Science, v. 5, n. 3C, p. 48–52, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matchar.2015.12.004>.

DAVANAGERI, M. B.; NARENDRANATH, S.; KADOLI, R. Effect of Sigma (σ) phase on Mechanical and Dry sliding wear. Materials Today: Proceedings, v. 4, n. 9, p. 10189–10196, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.06.346>.

DAVANAGERI, M.; NARENDRANATH, S.; KADOLI, R. Influence of ageing time on hardness, microstructure and wear behaviour of AISI2507 super duplex stainless steel. Materials Research Express, v. 4, n. 8, 2017.

DEL ABRA-ARZOLA, J. L. et al. Study of the effect of sigma phase precipitation on the sliding wear and corrosion behaviour of duplex stainless steel AISI 2205. Wear, v. 400–401, n. December 2017, p. 43–51, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.12.019>.

DIOMIDIS, N. et al. Tribocorrosion of stainless steel in sulfuric acid: Identification of corrosion-wear components and effect of contact area. Wear, v. 269, n. 1–2, p. 93–103, 2010. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2010.03.010>.

ESPALLARGAS, N. et al. A new experimental technique for quantifying the galvanic coupling effects on stainless steel during tribocorrosion under equilibrium conditions. Wear, v. 307, n. 1–2, p. 190–197, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2013.08.026>.

FARGAS, G.; MESTRA, A.; MATEO, A. Effect of sigma phase on the wear behavior of a super duplex stainless steel. Wear, v. 303, n. 1–2, p. 584–590, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2013.04.010>.

GAO, R. et al. Tribocorrosion Behavior of SAF 2205 Duplex Stainless Steel in Artificial Seawater. Journal of Materials Engineering and Performance, v. 28, n. 1, p. 414–422, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11665-018-3791-y>.

KHAN, W. N.; CHHIBBER, R. Effect of Intermetallic and Secondary Phases on Dry and Wet Sliding Wear Behavior of Super Duplex Stainless Steel. Tribology Transactions, v. 63, n. 3, p. 403–414, 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/10402004.2019.1694731>.

LANDOLT, D.; MISCHLER, S.; STEMP, M. Electrochemical methods in tribocorrosion: A critical appraisal. Electrochimica Acta, v. 46, n. 24–25, p. 3913–3929, 2001.

LÓPEZ-ORTEGA, A.; ARANA, J. L.; BAYÓN, R. Tribocorrosion of Passive Materials: A Review on Test Procedures and Standards. International Journal of Corrosion, v. 2018, 2018.

MAAMACHE, B. et al. Effect of Aging Temperature on the Microstructure, Local Mechanical Properties, and Wear Behavior of a UNS S32750 Super Duplex Stainless Steel. Journal of Materials Engineering and Performance, v. 30, n. 1, p. 546–555, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11665-020-05332-5>.

MISCHLER, S. Triboelectrochemical techniques and interpretation methods in tribocorrosion: A comparative evaluation. Tribology International, v. 41, n. 7, p. 573–583, 2008.

POSSOLI, F. A. de A. Tribocorrosão em meio salino do aço super duplex UNS S32750 nitretado por plasma em baixas temperaturas. 2020. Dissertação - PPGEM - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, , 2020. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br:8080/jspui/handle/1/25581>. Acesso em: 9 jun. 2023.

RIBEIRO, J. J. K. et al. Mechanical Characterization at Nanoscale of Austenite, Ferrite, and Sigma Phases via Hardness Measurement and Fretting Wear Behavior of a Duplex Stainless Steel. Metals, v. 13, n. 5, 2023.

SHOCKLEY, J. M.; HORTON, D. J.; WAHL, K. J. Effect of aging of 2507 super duplex stainless steel on sliding tribocorrosion in chloride solution. Wear, v. 380–381, p. 251–259, 2017a. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2017.03.019>.

SUN, Y.; HARUMAN, E. Tribocorrosion behaviour of low temperature plasma carburised 316L stainless steel in 0.5M NaCl solution. Corrosion Science, v. 53, n. 12, p. 4131–4140, 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.03.048>.

TURIN, A. R.; RIBEIRO, J. J. K.; DE QUADROS, P. V. C. A.; BORGES, P. C. EFEITO DE TRATAMENTOS ISOTÉRMICOS NA MICROESTRUTURA E MICRODUREZA DO AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX UNS S32205 (SAF 2205). Em: 2023, São Paulo, São Paulo. Anais.Em: XXII CONEMI. São Paulo, São Paulo Disponível em: <https://www.even3.com.br/anais/xxiiconemi/574696>. Acesso em: 23 ago. 2023.

VIEIRA, A. C. et al. Mechanical and electrochemical deterioration mechanisms in the tribocorrosion of Al alloys in NaCl and in NaNO3 solutions. Corrosion Science, v. 54, n. 1, p. 26–35, 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.corsci.2011.08.041>.

WANG, M. et al. Effect of Heat Treatment Temperature and Lubricating Conditions on the Fretting Wear Behavior of SAF 2507 Super Duplex Stainless Steel. Journal of Tribology, v. 141, n. 10, p. 1–8, 2019.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) (8888243228/2019-01) e a Aperam South America pelo apoio na realização deste projeto. Ao Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais (CMCM) pela utilização do Interferômetro óptico Taylor Hobson modelo CCI e ao Laboratório de Superfície e Contato (LASC) da UTFPR.

DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis por este trabalho.