



XXX Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica  
19 a 23 de agosto de 2024, Uberaba, Minas Gerais, Brasil

## EFEITO DA DEFORMAÇÃO PRÉVIA A FRIO NA MICRO-ABRASÃO-CORROSÃO

Gustavo Emmanuel Carvalho Borella Guidetti, [gustavo.guidetti@ufu.br](mailto:gustavo.guidetti@ufu.br)<sup>1</sup>  
Geberson da Silva Dias, [geberson.silva@ufu.br](mailto:geberson.silva@ufu.br)<sup>1</sup>  
Miguel Angel Navaez Ardila, [miguel.angel@ltad.com.br](mailto:miguel.angel@ltad.com.br)<sup>2</sup>  
Washington Martins da Silva Jr, [washington.martins@ufu.br](mailto:washington.martins@ufu.br)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Uberlândia, LTM (Laboratório de Tribologia e Materiais);

<sup>2</sup>Universidade Federal de Uberlândia, LTAD (Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste);

**Resumo.** Há um consenso geral na literatura de que as tensões geradas durante a abrasão são suficientemente elevadas para gerar endurecimento por deformação plástica, de modo que o endurecimento por deformação prévia não teria, de fato, efeito na resistência à abrasão. No entanto, algumas evidências na literatura recente mostraram que a deformação prévia a frio pode afetar consideravelmente a resistência ao desgaste. Estas descobertas sugerem que a deformação a frio prévia pode aumentar a resistência à abrasão, isto desde que a severidade imposta durante a abrasão não seja suficientemente elevada para induzir os mesmos mecanismos do encruamento por deformação, que ocorrem durante a deformação a frio. Sendo assim, processos submetidos a abrasão com menores severidades podem ser influenciados pela deformação a frio prévia, podendo ser o caso da micro-abrasão-corrosão (em particular utilizando partículas abrasivas finas e relativamente macias). Portanto, o objetivo do presente trabalho foi entender a investigação dos efeitos da laminação a frio sobre a resistência à micro-abrasão-corrosão em aços inoxidáveis com diferentes conteúdos de manganês. Para isso foram estudados dois aços inoxidáveis com composição química similar, mas com diferentes conteúdos de manganês, sendo: 201 (7,5%Mn) e 301 (1,5%Mn). Eles foram submetidos à micro-abrasão-corrosão com partículas abrasivas relativamente macias de sílica e ambiente eletrolítico de 1N H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Conforme os resultados a deformação a frio e o conteúdo de manganês apresentaram ter influência na micro-abrasão-corrosão de aços inoxidáveis.

**Palavras chave:** Micro-abrasão-corrosão, Coeficiente de atrito, Resistência ao desgaste, Deformação a frio, Conteúdo de manganês.

**Abstract.** There is a general consensus in the literature that the stresses generated during abrasion are high enough to generate plastic strain hardening, so that pre-strain hardening would, in fact, have no effect on abrasion resistance. However, some evidence in recent literature has shown that prior cold deformation can considerably affect wear resistance. These findings suggest that prior cold deformation can increase abrasion resistance, provided that the severity imposed during abrasion is not high enough to induce the same strain hardening mechanisms that occur during cold deformation. Therefore, processes subjected to less severe abrasion can be influenced by previous cold deformation, as may be the case with micro-abrasion-corrosion (in particular using fine and relatively soft abrasive particles). The objective of the present work was to extend the investigation of the effects of cold rolling on the resistance to micro-abrasion-corrosion in stainless steels with different manganese content. For this purpose, two stainless steels with similar chemical composition, but with different manganese contents, will be studied: 201 (7.5%Mn) and 301 (1.5%Mn). They will be subjected to micro-abrasion-corrosion with relatively soft abrasive silica particles and an electrolytic environment of 1N H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. According to the results, cold deformation and manganese content were found to have an influence on the micro-abrasion-corrosion of stainless steels.

**Keywords:** Micro-abrasion-corrosion, Friction coefficient, Wear resistance, Cold deformation, Manganese content.

### 1. INTRODUÇÃO

A busca incessante por otimização dos processos industriais é um imperativo para a manutenção da competitividade no mercado. Grandes perdas econômicas são frequentemente associadas a paradas não programadas devido ao desgaste precoce de componentes mecânicos, ressaltando a importância do estudo e compreensão dos mecanismos de desgaste (RIBEIRO, 2020). Enquanto tradicionalmente se acredita que as tensões geradas durante a abrasão são suficientes para induzir endurecimento por deformação plástica, evidências recentes têm sugerido que a deformação prévia a frio pode, de fato, influenciar significativamente a resistência ao desgaste (LABIAPARI et al, 2013; DE MELLO et al., 2017).

Essas descobertas são particularmente relevantes em contextos nos quais processos de abrasão com menor severidade podem ser influenciados pela deformação a frio prévia, como é o caso da micro-abrasão-corrosão (DE MELLO et al., 2017). Nesse sentido, compreender os efeitos da laminação a frio sobre a resistência à micro-abrasão-corrosão em aços inoxidáveis com diferentes conteúdos de manganês torna-se crucial. Para tanto, o presente estudo se propôs a investigar os efeitos da deformação prévia a frio em aços inoxidáveis, utilizando dois materiais com composição química similar, mas diferentes teores de manganês: o aço 201 (7,5% Mn) e o aço 301 (1,5% Mn). A análise foi conduzida por meio de ensaios de micro-abrasão-corrosão, utilizando partículas abrasivas finas e um ambiente eletrolítico específico (DE MELLO et al., 2017).

Os resultados obtidos contribuíram não apenas para uma melhor compreensão dos mecanismos que regem a resistência à abrasão em aços inoxidáveis, mas também para o desenvolvimento de estratégias mais eficazes de manutenção e seleção de materiais na indústria, visando a redução de perdas econômicas associadas ao desgaste prematuro de componentes mecânicos.

## 2. METODOLOGIA

A metodologia consistiu em comparar o comportamento à abrasão-corrosão “in situ” de dois tipos de aços inoxidáveis laminados a frio com diferentes taxas de deformação. Para esse propósito usou-se o equipamento de micro-abrasão-corrosão desenvolvido no Laboratório de Tribologia e Materiais (LTM-UFU) designado micro-abrasão-corrosão (Figura 1). Este equipamento é apresentado e definido sua metodologia em trabalhos anteriores desenvolvidos (COSTA et al., 2015; LABIAPARI, 2015; SANTOS et al., 2015; ARDILA, 2017; LABIAPARI et al., 2017; ARDILA et al., 2019; LABIAPARI et al., 2019). De forma geral a metodologia do ensaio pode ser resumida como:

- 1) preparação superficial da amostra (8 a 14 horas antes do ensaio);
- 2) vedação das amostras e fixação no porta-amostra (logo após a preparação superficial);
- 3) montagem no equipamento, umidificar com solução eletrolítica a superfície da amostra (garantir a ponte eletrolítica);
- 4) zeragem das forças;
- 5) acionar o bombeamento de lama abrasivo-eletrolítica sobre a amostra, de forma que seja criada uma ponte eletrolítica;
- 6) estabelecer o contato amostra/esfera e estabilização do potencial de circuito aberto (OCP) por 15 min;
- 7) inicialização no mesmo instante do motor e a polarização potenciodinâmica (desta forma se acompanha o crescimento da calota com a evolução da curva de polarização potenciodinâmica anódica);
- 8) ensaio micro-abrasivo-corrosivo por 30 min;
- 9) finalização da micro-abrasão, no mesmo instante que finaliza o ensaio de polarização;
- 10) limpeza da amostra (ultrassom por 5 min, submersa em acetona);
- 11) medição e análise das calotas geradas.

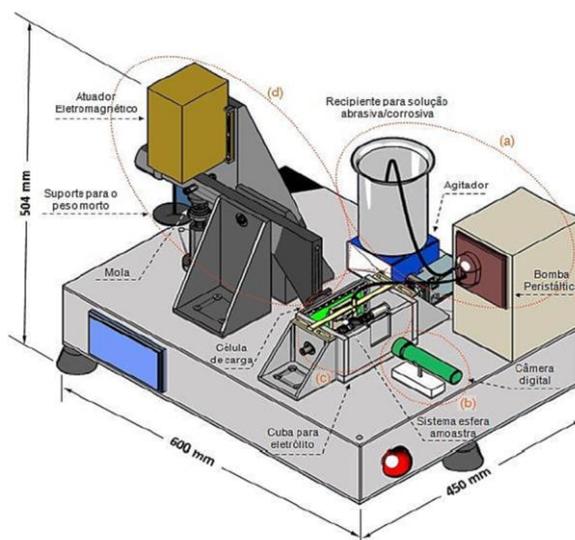


Figura 1. Desenho esquemático do equipamento de micro-abrasão-corrosão projetado no LTM (SANTOS et al., 2015).

Como amostras foram usados os aços inoxidáveis austeníticos 301F e 201F produzidos pela Arcelor Mittal South America. Esses aços possuíam composição química similares com exceção da composição do manganês (Mn) o qual foi variado, como é apresentado na Tabela 1. Esperava-se que com a mudança de concentração de manganês pudesse existir uma mudança nos resultados de micro-abrasão-corrosão.

Tabela 1. Composição química dos aços inoxidáveis austeníticos 301F e 201F.

	Elementos								
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	N
<b>301F</b>	0,26	1,46	0,47	0,029	0,001	17,30	6,51	0,05	0,100
<b>201F</b>	0,30	7,19	0,58	0,029	0,002	17,30	4,16	0,06	0,157

Esses aços foram deformados com diferentes graus de deformação a frio. Para isso as amostras foram submetidas à laminação a frio usando-se um laminador piloto de laboratório do centro de pesquisa da Arcelor Mittal South America, sendo o mesmo laminador indicado em trabalhos prévios de abrasão e deformação a frio (DE MELLO et al., 2017; LABIAPARI et al., 2017; RIBEIRO, 2020; ANDRADE, 2021). O encruamento gerado pela laminação a frio foi evidenciado por um trabalho prévio (ANDRADE, 2021), usando o mesmo lote de amostras que o presente estudo, no qual evidenciou-se o aumento de dureza conforme o crescimento da taxa de deformação a frio, elevando o seu valor em 61,21 % no 301LN e 47,66 % no 201LN. Além disso, pode-se notar também que os valores de microdureza das amostras de 201LN foram sempre maiores do que as de 301LN, em média, 6,75 %. Outro fato importante a ser observado é a tendência da diferença da microdureza entre os dois materiais se reduzirem com o aumento da taxa de deformação a frio (ANDRADE, 2021).

As amostras tiveram dimensões de aproximadamente 25 x 35 mm com espessura inicial de 4 mm, além disso, controlou-se que após a preparação da superfície (lixamento) a espessura no teste fosse a mesma para todos os testes, isto para eliminar alguma influência da espessura nos ensaios. Assim nas amostras com 20 e 40% de deformação a frio foram colados batentes para conservar espessuras similares com as outras amostras. Para cada material as amostras foram lixadas até a lixa de granulometria 600 (antes passando por lixas 80, 180, 220 e 320). O lixamento foi feito para que os sulcos do lixamento estivessem na direção paralela ao movimento da esfera para não dificultar a entrada de partículas abrasivas no contato conforme estudos desenvolvidos no laboratório (COSTA et al., 2015; ARDILA et al., 2019). Após este passo, as amostras foram sujeitas a limpeza por ultrassom em acetona durante 5 min. Por último as amostras foram vedadas conforme os procedimentos de trabalhos anteriores (COSTA et al., 2015; LABIAPARI, 2015; SANTOS et al., 2015; ARDILA, 2017; LABIAPARI et al., 2017; ARDILA et al., 2019; LABIAPARI et al., 2019), sendo que essa vedação da amostra para execução do ensaio micro-abrasivo-corrosivo é necessária para que a corrosão eletroquímica atue numa área superficial específica da amostra. Sem a vedação o sistema não estabiliza e a corrosão pode-se focar em áreas com maior energia livre como as bordas da amostra e obtendo só sinais de ruído para a polarização.

As partículas abrasivas foram de sílica (SiO<sub>2</sub>) fabricadas pela Sigma Aldrich, apresentaram tamanho médio de 1,92 µm (d<sub>50</sub> = 1,48 µm) e formato bastante arredondado. Segundo o fabricante, sua dureza nominal era de 8,1 GPa. A concentração da pasta foi de 20% em peso.

Para o estudo da parte corrosiva do teste foi utilizado um potenciostato BioLogic SP150, e o software de aquisição de dados EC-LAB® V11.01, fornecido pelo fabricante.

Para a leitura e aquisição das forças aplicada nos ensaios foram usadas células de carga tridimensional do fabricante ATI Industrial Automation modelo Nano43®, faixa de trabalho 0,1 a 53 N. A aquisição dos dados da célula foi por meio de um sistema de controle do fabricante National Instruments e gerenciado por um software desenvolvido no LTM-UFU com interface no “software” LabView.

Os ensaios micro-abrasivo-corrosivos foram feitos sem intervalos para medição da calota, que só foi medida no final do ensaio e desta forma poder avaliar o comportamento eletroquímico de forma potenciodinâmica (curva de polarização anódica). Os 30 minutos já foram estabelecidos como padrão em trabalhos anteriores do LTM (LABIAPARI, 2015; ARDILA, 2017), tempos mais longos poderiam mudar de forma considerável a topografia de superfície do contra-corpo, e desta forma afetar o resultado do ensaio. Adicionalmente, tempos mais curtos precisariam de uma taxa de aumento potencial elétrico maior o que poderia provocar perda de resolução na elaboração da curva de polarização (ARDILA, 2017). Com isto, a taxa de aumento de potencial foi fixa em 0,85 mV/s.

O meio eletrolítico foi uma solução 1N de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> em água destilada. A lama abrasiva constituída de 10% em peso de SiO<sub>2</sub> misturada no meio eletrolítico mencionado.

Esferas de zircônia-alumina foram usadas como contra-corpo. O material do contra-corpo objetiva inibir a corrosão nele para não interferir com os resultados de polarização. A rugosidade média (Ra) ficou entre 0,20 µm < Ra < 0,26 µm, medida com um perfilômetro Taylor Hobson Talysurf Intra2. A preparação controlada das bolas de zircônia foi feita por moagem com lixa de SiC malha 220 por 20 min, metodologia usada em trabalhos anteriores (LABIAPARI, 2015; LABIAPARI et al., 2017; ARDILA et al., 2019; LABIAPARI et al., 2019; ANDRADE, 2021). Para isso, uma chapa de aço, 400 x 150 x 1 mm, coberta com lixa, foi acoplada a uma politriz rotativa. Em uma das extremidades da chapa, em um furo de aproximadamente 100 mm de diâmetro, foi instalado um cone polimérico, dentro do qual a bola desenvolvia um movimento de rotação sobre a lixa na presença de água. O controle da topografia da esfera teve como objetivo garantir condições semelhantes de arrastamento de partículas, conforme proposto na literatura (ALLSOPP; TREZONA; HUTCHINGS, 1998; COSTA et al., 2015).

Após os testes micro-abrasivo-corrosivos foram analisadas as calotas geradas via por intermédio do MEV. A microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi desenvolvida no equipamento da marca ZEISS modelos Leo 940A® e Evo MA10®. A configuração para imagens feitas com elétrons secundários foi: uma potência de feixe de 20 KV e uma corrente de 120 pA.

### 3. RESULTADOSS

A média dos resultados do coeficiente de desgaste (k) para amostras de aço inoxidável 301 e 201, após 30 minutos de teste contínuo de micro-abrasão-corrosão, são apresentados na Figura 2. Como primeira observação destes resultados teve-se o fato da taxa de desgaste (k) ser maior para o aço 301 (1,5%Mn) que para o aço 201 (7,5%Mn), sendo entre 24 e 29% para amostras sem deformação ou 10% de deformação a frio, entre 41 e 48,5% para amostras com 20 ou 40% de deformação a frio, ou seja, amostras com maior conteúdo de manganês se mostraram mais resistentes a abrasão-corrosão.

Outro fato relevante foi que os resultados mostraram uma tendência do coeficiente de desgaste k diminuir com o aumento de deformação a frio prévio, como mostram as linhas azuis e vermelha. Para o aço 301, com menor conteúdo de manganês, essa tendência a diminuir aparentou ser mais constante e menor (linha vermelha - Figura 2) quando comparada com o aço 201 de maior conteúdo de manganês (linha azul - Figura 2). Para o aço 301 a tendência de diminuir o desgaste com a deformação prévia a frio foi mais pronunciada, mas após os 20% de deformação o desgaste aparenta ser constante, ou seja, não teve mais influência na deformação a frio prévia. Assim as sequências de porcentagem de diminuição do desgaste com a deformação a frio prévia de 10 para 20 e para 40% de deformação foi de: 4% → 7% → 10% para aços 301 (1,5 Mn) e de 11% → 17% → 2% para aços 201 (7,5 Mn).

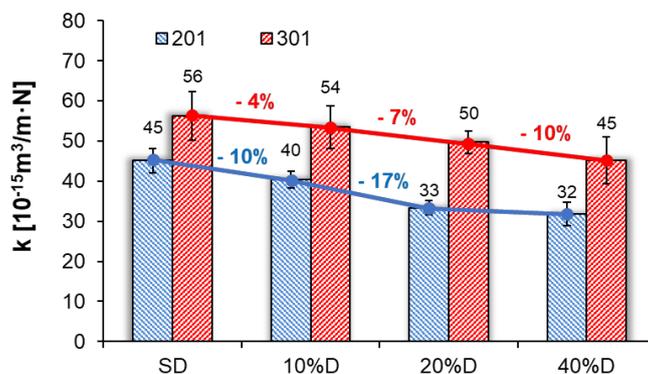


Figura 2. Coeficiente de desgaste médio para as amostras de aço inoxidável 201 (7,5%Mn) e 301 (1,5%Mn) com diferentes deformações a frio prévias respeitando a sua espessura inicial: sem deformação (SD), 10% deformada (10%D), 20% deformada (20%D) e 40% deformada (40%D). As linhas azul e vermelha indicam a porcentagem de diminuição do desgaste do aço 201 e 301 respectivamente.

Esse efeito da deformação na micro-abrasão-corrosão foi observado também na Figura 3 do coeficiente de atrito médio durante os testes, nele tem-se um comportamento similar ao coeficiente desgaste. O coeficiente de atrito acompanha a mesma tendência de comportamento que a taxa de desgaste, mas em menores proporções de porcentagem de diminuição quando se aumenta a porcentagem de deformação a frio.

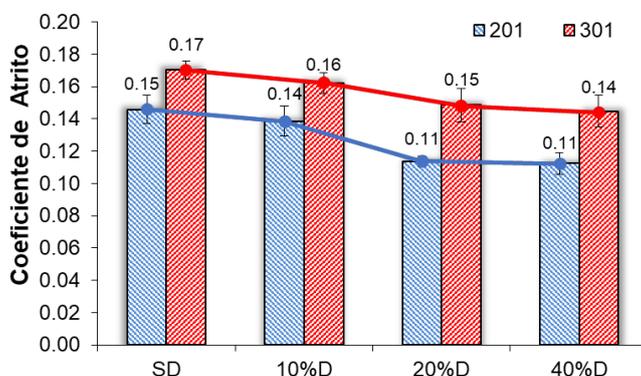


Figura 3. Coeficiente de atrito médio para os ensaios de micro-abrasão-corrosão: (a) de aços 201 (7,5%Mn) e 301 (1,5%Mn) com e sem deformação a frio prévia. As linhas azul e vermelha indicam a porcentagem de diminuição do coeficiente de atrito do aço 201 e 301 respectivamente.

Esse comportamento do coeficiente de atrito ajudou a entender os resultados de desgaste, como os coeficientes de atrito mais altos que levaram ao maior desgaste. Sendo os valores de atrito menores para aços com maior conteúdo de manganês (201), e maiores para aços com menor conteúdo de manganês (301).

Assim, os resultados mostraram que a deformação prévia a frio influenciou, de forma positiva, a resistência ao desgaste na micro-abrasão-corrosão, pela redução do coeficiente de atrito. Além disso, o conteúdo de manganês no aço inoxidável influenciou um aumento na proporção na que a deformação a frio influi na resistência ao desgaste. Maiores conteúdos de manganês levam a que o aumento da resistência ao desgaste gerada pela deformação a frio seja proporcionalmente maior.

A Figura 3 mostrou que existe encruamento após a deformação a frio, sendo que a dureza aumentou com o grau de deformação a frio, coincidindo com a teoria de encruamento e movimentação de discordâncias. As maiores durezas foram apresentadas no aço com maior conteúdo de manganês (201). Pode-se supor que o grau de encruamento influenciou a resistência ao desgaste, mas o aumento da dureza pela deformação não é proporcional às reduções do coeficiente de desgaste. Assim, outros fatores sinérgicos devem ter influenciado além do encruamento próprio da deformação a frio.

O trabalho prévio de Andrade (2021) que avaliou a micro-abrasão pura dos mesmos lotes de amostras do presente trabalho (201 e 301) com as mesmas deformações (0, 10, 20 40%) no mesmo, não apresentou relação entre a resistência ao desgaste e a deformação prévia a frio. Considerando que Andrade (2021) usou parâmetros microabrasivos similares aos usados no presente trabalho, sendo: mesmas partículas abrasivas de  $\text{SiO}_2$  com concentração de 10%, contra-corpo de zircônia e força normal similar; pode-se comparar os resultados de coeficiente de desgaste para micro-abrasão apresentados por Andrade (2021) com os apresentados no presente trabalho (Figura 2) para micro-abrasão-corrosão. O coeficiente de desgaste dos resultados da micro-abrasão (entre 11 e  $16 \times 10^{-14} \text{ m}^3/\text{Nm}$ ) é perto de uma ordem de grandeza maior que os resultados apresentados no presente estudo para micro-abrasão-corrosão (entre 32 e  $56 \times 10^{-13} \text{ m}^3/\text{Nm}$ ). As literaturas recentes de trabalhos desenvolvidos no LTM apresentaram a sinergia negativa na micro-abrasão-corrosão quando comparado com a micro-abrasão (COSTA et al., 2015; SANTOS et al., 2015; LABIAPARI et al., 2017; ARDILA et al., 2019; LABIAPARI et al., 2019) sendo a redução do coeficiente de atrito o principal fator para essas diferenças.

A literatura descreve que a formação de  $\text{FeSO}_4$  em sistemas tribocorrosivos contendo ácido sulfúrico é o principal fator responsável pela redução do coeficiente de atrito (KOLESNICHENKO; TRUSHKO, 1970; MIYOSHI, 1990). A presença de enxofre foi identificada nas superfícies testadas na micro-abrasão-corrosão em trabalhos anteriores desenvolvidos no LTM (LABIAPARI, 2015; SANTOS et al., 2015; ARDILA, 2017; LABIAPARI et al., 2017; ARDILA et al., 2019; ARDILA; COSTA; DE MELLO, 2020). Sabe-se que o ferro na presença de uma solução eletrolítica com  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , leva à formação de  $\text{FeSO}_4$  na superfície metálica pela dissolução química (ARDILA; LABIAPARI; MELLO, 2017; DE MELLO et al., 2017). Labiapari et al. (2017) tentaram mostrar a existência do filme de  $\text{FeSO}_4$ , expondo uma amostra de aço inoxidável 410D a um meio 1N de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  durante uma hora e em seguida submetendo-o a análise de FTIR (“*Fourier transform infrared spectroscopy*”). Após análise de FTIR constatou-se no espectro a presença de picos de umidade,  $\text{H}_2\text{O}$ , e principalmente, a confirmação da formação de  $\text{FeSO}_4$  como produto de corrosão. Mas os autores relataram que a técnica não possuía a suficiente sensibilidade para detectar de forma adequada os filmes de  $\text{FeSO}_4$  nas marcas de desgaste produzidas na micro-abrasão-corrosão. A tribocamada autolubrificante faz as partículas abrasivas deslizarem pela superfície sem desgastar fazendo com que o desgaste seja consideravelmente menor na micro-abrasão-corrosão. Com isto, supôs-se que as modificações oriundas dos processos mecano-eletróquímicos produzidas no processo triboquímico influenciam favoravelmente o comportamento do material pela formação de filmes oriundos do processo eletroquímico na superfície ( $\text{FeSO}_4$ ). Pensando em termos energéticos, uma parcela da energia que era destinada no desgaste na micro-abrasão está sendo gasta nas partículas para vencer o filme autolubrificante, assim menos energia usada no desgaste para a micro-abrasão-corrosão.

Da mesma forma, menos energia gasta no desgaste na micro-abrasão-corrosão fez com que características e propriedades superficiais sejam mais relevantes, como é o caso do encruamento gerado pela deformação. Assim, a deformação a frio teve influência significativa na micro-abrasão-corrosão enquanto na micro-abrasão essa influência não foi evidenciada.

Nessa mesma linha de raciocínio, fenômenos sinérgicos no sistema micro-abrasivo-corrosivo puderam influenciar também nos resultados de coeficiente de desgaste apresentados. Como foi dito anteriormente o encruamento pela deformação não foi proporcional às reduções do coeficiente de desgaste, assim outros fatores sinérgicos puderam influenciar os resultados. Assim, as curvas de polarização obtidas nos ensaios micro-abrasivo-corrosivos puderam dar novas evidências. A Figura 4 apresenta as curvas de polarização características que melhor representam os resultados dos testes de micro-abrasão-corrosão em aços inoxidáveis 201 e 301 com diferentes porcentagens de deformação prévia a frio. De forma geral as menores densidades de corrente foram apresentadas nos aços mais deformados a frio e com maior conteúdo de manganês, ou seja, a deformação prévia influenciou na resistência a corrosão quando existe micro-abrasão conjunta.

Além, observou-se um comportamento passivo para todas as configurações, mas com maior “ruído” nos aços 201 com maior conteúdo de manganês. Uma evidência desta constante remoção e geração da camada passiva é a flutuação (ruído) observada na densidade de corrente. A flutuação na corrente deve-se à repassivação espontânea dentro da cicatriz de desgaste e posterior despassivação devido à ação de partículas abrasivas (WOOD et al., 2010). Mischler et al. (1998) relataram um comportamento (ruído) semelhante durante o desgaste em deslizamento alternativo de metais passivos (aço inoxidável 316), afirmando que a variação abrupta (ruído) da corrente anódica medida corresponde à taxa de remoção de

metal eletroquímico na marca de desgaste. Assim, este comportamento passivo e ruído apresentado nas curvas mostraram que existe uma cinética contínua de repassivação nos aços inoxidáveis 201 e 301, sendo mais significativa nos aços com maior conteúdo de manganês (201) os quais apresentaram maior ruído e menores densidades de corrente.

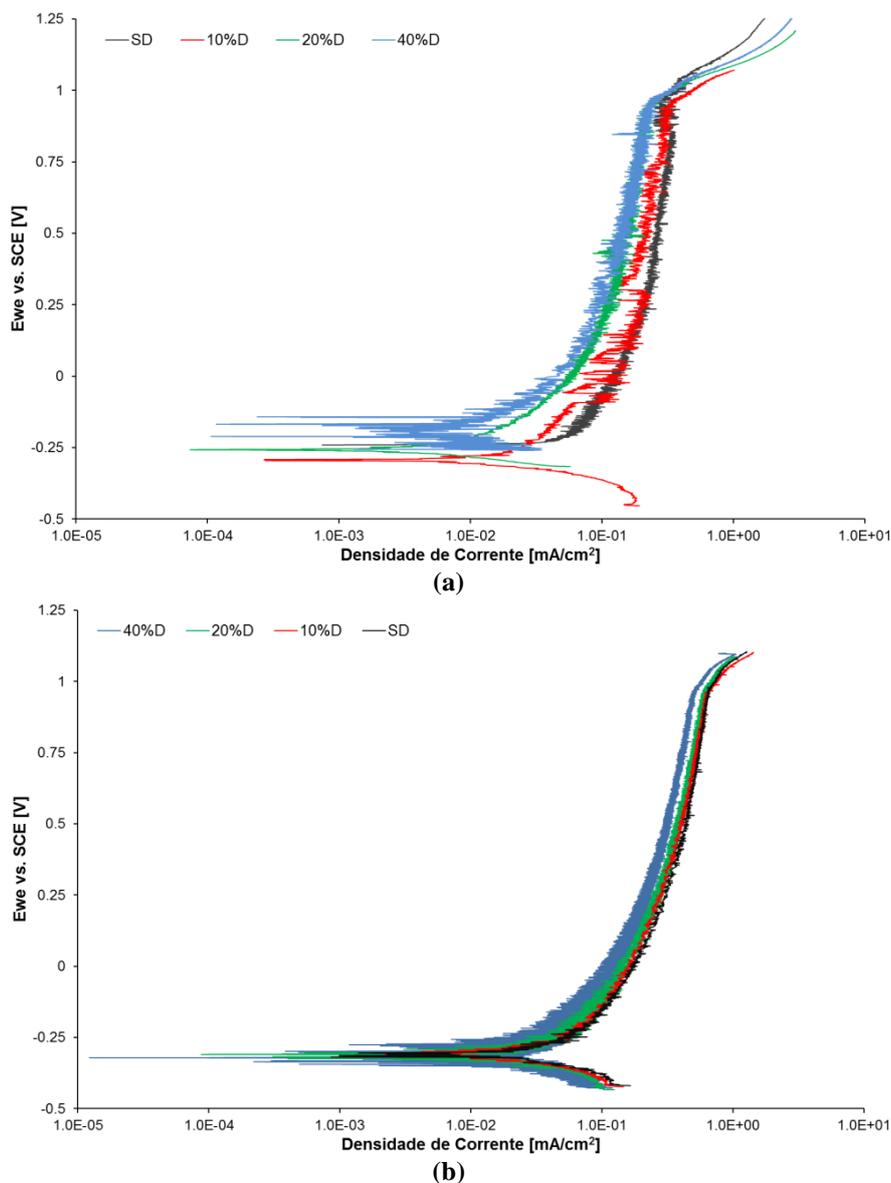


Figura 4. Curvas de polarização características para ensaios de abrasão-corrosão (Ab-C) para aços inoxidáveis 201 (7,5%Mn) e 301 (1,5%Mn) com diferentes graus de deformação prévia a frio: sem deformação (SD), 10% deformada (10%D), 20% deformada (20%D) e 40% deformada (40%D).

Para conseguir comparar de forma mais efetiva os resultados das curvas de polarização (Figura 4) apresenta-se na Figura 5 as médias da densidade de corrente em um potencial de 475 mV das curvas de polarização para ensaios de abrasão-corrosão em aços inoxidáveis 201 (7,5%Mn) e 301 (1,5%Mn) com diferentes graus de deformação prévia a frio. Observa-se que existiu uma diminuição de entre 39 e 70% na densidade de corrente de passivação (I450mV) do aço 301 para o aço 201, para cada grau de deformação a frio, ou seja, existiu maior resistência à corrosão com o aumento do conteúdo de manganês no aço.

Além disso, evidenciou-se uma influência da deformação a frio na resistência à corrosão, com maiores graus de deformação a frio com menores densidade de corrente de passivação. As tendências de comportamento indicadas pelas linhas azul e vermelha, para os aços 201 e 301 respectivamente, coincidiram com as tendências de comportamento dos coeficientes de desgaste e de atrito. Assim as sequências de porcentagem de diminuição da densidade de corrente de passivação com a deformação a frio prévia de 10 para 20 e para 40% de deformação foi de: 7% → 8% → 16% para aços 301 (1,5 Mn) e de 19% → 29% → 2% para aços 201 (7,5 Mn). Pode-se dizer que a deformação a frio e o conteúdo de manganês no aço inoxidável influenciam a cinética da repassivação em sistemas micro-abrasivo-corrosivos, sendo que a

maiores graus de deformação existe uma melhor dinâmica de repassivação e consequentemente maior resistência à corrosão.

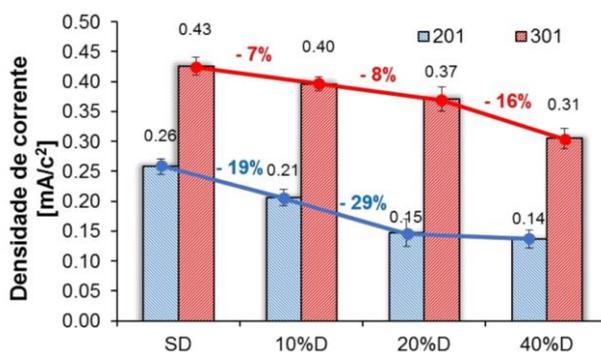


Figura 5. Densidade de corrente média em um potencial de 475 mV das curvas de polarização para ensaios de abrasão-corrosão em aços inoxidáveis 201 (7,5%Mn) e 301 (1,5%Mn) com diferentes graus de deformação prévia a frio: sem deformação (SD), 10% deformada (10%D), 20% deformada (20%D) e 40% deformada (40%D).

Com as análises anteriores e tentando associar a termos de energia, pôde-se supor que a deformação a frio em aços inoxidáveis tem influência nos sistemas micro-abrasivo-corrosivos, ao precisar maiores quantidades de energia para a deformação/desgaste, esse requerimento de energia para deformação/desgaste aumenta com o aumento do grau de deformação a frio. O maior requerimento de energia com o grau de deformação foi evidenciado por fatores relatados, sendo: o encruamento e a cinética de repassivação do aço. Esses fatores agem de forma sinérgica, e suas associações levam a diminuição do coeficiente de atrito com o grau de deformação e consequentemente diminuição do coeficiente de desgaste. Além disso, o aumento do conteúdo de manganês aumenta mais ainda o requerimento de energia para deformação/desgaste. Mas existe uma saturação do sistema na qual a energia requerida chega a um limite. Essa saturação é evidenciada ao observar os resultados de coeficiente de desgaste (Figura 2) e atrito (Figura 3) e a densidade de corrente de passivação (Figura 5) para o aço 201 (maior conteúdo de manganês) nos graus de deformação de 20 e 40%.

Os maiores requerimentos de energia poderam ser evidenciados ao observar o aspecto de desgaste, maiores requerimentos energéticos para o desgaste tendem a uma menor severidade deste. A Figura 6 evidencia que existiu uma mudança no padrão dos sulcos gerados nas calotas de desgaste com o aumento do manganês e a deformação a frio. Maiores conteúdos de manganês e graus de deformação a frio diminuíram aparentemente a largura dos sulcos e espaçamento entre eles, evidenciando uma mudança na severidade do desgaste abrasivo com o aumento do grau de deformação. Ardila (2017) apresentou que existe maiores taxas de desgaste com sulcos mais largos sendo mais espaçados.

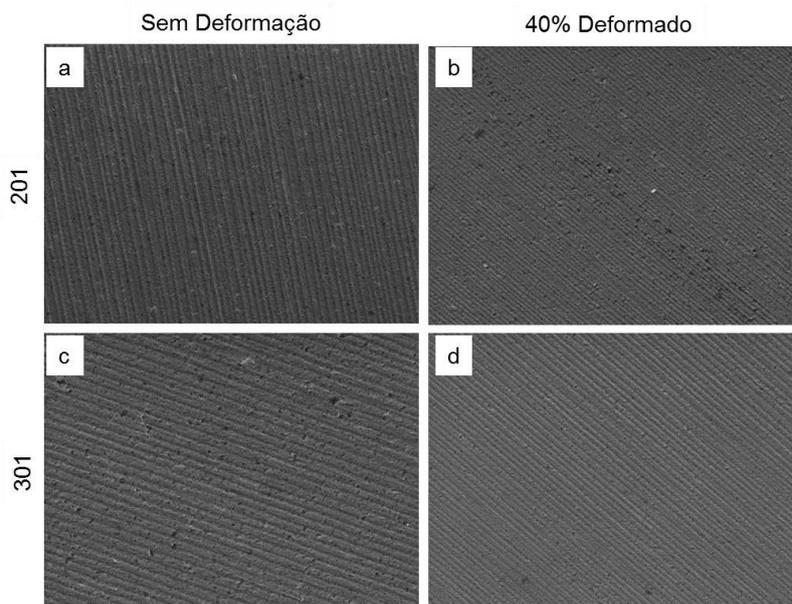


Figura 6. Microscopia eletrônica de varredura do centro das calotas geradas após testes de micro-abrasão-corrosão para aços inoxidáveis 201 (7,5%Mn) e 301 (1,5%Mn) com e sem deformação.

#### 4. CONCLUSÕES

A taxa de desgaste (k) foi maior entre 24 e 48,5% para o aço 301 (1,5Mn) do que para o aço 201 (7,5Mn), para amostras com e sem deformação.

A deformação a frio e o conteúdo de manganês tiveram influência significativa na micro-abrasão-corrosão de aços inoxidáveis enquanto estudos prévios na micro-abrasão não evidenciaram alguma influência.

Existiu uma diminuição da taxa de desgaste com o aumento da taxa de deformação prévia frio, sendo em maiores proporções com o aumento de conteúdo de manganês no aço inoxidável. Assim como o coeficiente de atrito e densidades de corrente de passivação foram menores quando aumentou o grau de deformação.

Pode-se dizer que a deformação a frio e o conteúdo de manganês no aço inoxidável influenciam a cinética da repassivação em sistemas micro-abrasivo-corrosivos, sendo que os maiores graus de deformação exigem uma melhor dinâmica de repassivação e conseqüentemente maior resistência à corrosão.

Pode-se supor que a deformação a frio em aços inoxidáveis tem influência nos sistemas micro-abrasivo-corrosivos, ao precisar maiores quantidades de energia para a deformação/desgaste, esse requerimento de energia para deformação/desgaste aumenta com o aumento do grau de deformação a frio.

Os maiores requerimentos de energia na micro-abrasão-corrosão são devidos à sinergia entre o encruamento e a cinética de repassivação do aço.

Maiores conteúdos de manganês e graus de deformação a frio diminuíram aparentemente a largura dos sulcos e espaçamento entre eles, evidenciando uma mudança na severidade do desgaste abrasivo com o aumento do grau de deformação.

#### 5. REFERÊNCIAS

- ALLSOPP, D. N.; TREZONA, R. I.; HUTCHINGS, I. M. The effects of ball surface condition in the micro-scale abrasive wear test. *Tribology Letters*, v. 5, n. 4, p. 259-264, 1998. ISSN 1573-2711.
- ANDRADE, G. H. A. Influência do manganês na microabrasão de aços inoxidáveis austeníticos laminados a frio. 2021. 33 f. TCC Graduação em Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Uberlândia.
- ARDILA, M. A. N. Influence of nature and surface topography on micro-abrasion and micro-abrasion-corrosion. 2017. 143 f. Thesis PhD - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- ARDILA, M. A. N.; LABIAPARI, W. S.; COSTA, H. L.; DE MELLO, J. D. B. Influence of stainless-steel specimen topography on micro-abrasion and micro-abrasion-corrosion. *Wear*, v. 426-427, p. 1482-1495, 2019/04/30/ 2019. ISSN 0043-1648.
- COSTA, H. L.; ARDILA, M. A. N.; LABIAPARI, W. S.; SILVA, W. M.; DE MELLO, J. D. B. Effect of surface topography on the dynamics of the abrasive particles during micro-abrasion. *Wear*, v. 324-325, p. 129-139, 2015. ISSN 0043-1648.
- DE MELLO, J. D. B.; LABIAPARI, W. S.; ARDILA, M. A. N.; OLIVEIRA, S. A. G.; COSTA, H. L. Strain Hardening: Can it Affect Abrasion Resistance? *Tribology Letters*, v. 65, n. 2, p. 67, 2017. ISSN 1573-2711.
- LABIAPARI, W. S. Abrasão-corrosão em aços inoxidáveis ferríticos. 2015. 211 f. Tese Doutorado em Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Uberlândia.
- LABIAPARI, W. S.; ALCÂNTARA, C. M.; COSTA, H. L.; DE MELLO, J. D. B. Stainless steel as an antiwear material for the bio-fuel industry. *Wear*, v. 302, n. 1-2, p. 1536-1545, 2013. ISSN 0043-1648.
- LABIAPARI, W. S.; ARDILA, M. A. N.; COSTA, H. L.; DE MELLO, J. D. B. Micro abrasioncorrosion of ferritic stainless steels. *Wear*, v. 376-377, Part B, p. 1298-1306, 2017. ISSN 0043-1648.
- W.S. Labiapari, M.A.N. Ardila, C. Binder, H.L. Costa, J.D.B. de Mello. Mechanical effects on the corrosion resistance of ferritic stainless steels during microabrasion-corrosion, *Wear*, Volumes 426-427, Part B, 2019, Pages 1474-1481, ISSN 0043-1648, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.12.057>.
- MISCHLER, S.; DEBAUD, S.; LANDOLT, D. Wear-Accelerated Corrosion of Passive Metals in Tribocorrosion Systems. *Journal of The Electrochemical Society*, v. 145, n. 3, p. 750- 758, March 1, 1998 1998.
- RIBEIRO, R. V. Efeito da deformação plástica prévia na resistência ao desgaste abrasivo em aços inoxidáveis. 2020. 73 f. Dissertação de mestrado - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- SANTOS, M. B.; LABIAPARI, W. S.; ARDILA, M. A. N.; DA SILVA, W. M.; DE MELLO, J. D. B. Abrasion-corrosion: New insights from force measurements. *Wear*, v. 332-333, p. 1206- 1214, 2015. ISSN 00431648.
- WOOD, R. J. K.; SUN, D.; THAKARE, M. R.; DE FRUTOS ROZAS, A.; WHARTON, J. A. Interpretation of electrochemical measurements made during micro-scale abrasion-corrosion. *Tribology International*, v. 43, n. 7, p. 1218-1227, 2010. ISSN 0301-679X.

#### 6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.