


Comportamento do aço ferrítico AISI 430 em relação ao austenítico AISI 304 submetidos a diferentes condições de lubrificação

Behavior of AISI 430 ferritic steel in relation to AISI 304 austenitic steel subjected to different lubrication conditions

Géssica Seara Faria^{1,2} , Wilian da Silva Labiapari², Luiz Paulo Brandao¹

¹Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

²Aperam South America. Timóteo, MG, Brasil.

e-mail: gessica.seara.faria@gmail.com, wilian.labiapari@aperam.com, brandao@ime.eb.br

RESUMO

Nos processos de conformação de materiais metálicos, como a laminação a frio de aços inoxidáveis, a deformação é induzida pelo movimento relativo entre o material e a ferramenta, resultando em forças de atrito. No entanto, os materiais apresentam comportamentos distintos durante a deformação plástica. Neste estudo, foram conduzidos ensaios de microesclerometria para investigar o efeito de diferentes condições de lubrificação no comportamento tribológico de amostras de aço inoxidável AISI 304 e AISI 430, previamente encruadas por laminação a frio. Os resultados do coeficiente de atrito e da profundidade de penetração dos riscos foram analisados, além do perfil dos riscos ter sido investigado por meio de perfilometria 3D. Nos ensaios de microesclerometria, não foram observadas diferenças significativas no coeficiente de atrito em função da condição de lubrificação para ambos os aços. O coeficiente de atrito do aço AISI 430 foi cerca de 23% maior que o do aço AISI 304, devido ao aumento de rugosidade resultante de sua deformação plástica. A profundidade de penetração foi maior para o aço AISI 304, devido à transformação da austenita metaestável em martensita durante a deformação. A análise do perfil dos riscos por perfilometria revelou que não houve remoção significativa de material, apenas deslocamento de material do sulco para as bordas do risco.

Palavras-chave: Microesclerometria; Deformação; Coeficiente de atrito; AISI 430; AISI 304.

ABSTRACT

In metallic materials forming process, in general, which includes the cold rolling of stainless steels, deformation is induced by the relative movement between the material and the tool used, resulting in friction forces. However, materials behave differently during plastic deformation. In this study, microsclerometry tests were carried out to investigate the effect of different lubrication conditions on the tribological behavior of AISI 304 and AISI 430 stainless steel samples, previously hardened via cold rolling. The results of the friction coefficient and the depth of penetration of the scratches were analyzed, in addition to the scratch profile being investigated using 3D profilometry. In the microsclerometry tests, no significant differences were observed in the coefficient of friction as a function of the lubrication condition used for both steels. The coefficient of friction of the AISI 430 steel was around 23% higher than that of the AISI 304 steel due to the increase in roughness due to plastic deformation of the AISI 430 steel. The penetration depth was higher for AISI 304 steel due to the transformation of metastable austenite into martensite by deformation. Analysis of the profile of the scratches via profilometry revealed that there was no significant material removal, only displacement from the groove to the edges of the scratch.

Keywords: Microsclerometry; Deformation; Coefficient of friction; AISI 430; AISI 304.

1. INTRODUÇÃO

Nos processos de conformação de aços inoxidáveis e metais em geral, a deformação é causada pelo movimento relativo entre a chapa e a ferramenta de contato, o que gera forças de atrito. Vários autores [1–3] salientaram que a influência dos aspectos relacionados com o atrito tem sido uma preocupação fundamental nos processos de conformação, uma vez que as forças de atrito na interface peça-ferramenta determinam a uniformidade da deformação da chapa e a qualidade da superfície do material final. TRZEPIECIŃSKI [2] observou que as

propriedades mecânicas da chapa metálica são fatores importantes e que a consideração inadequada destes fatores no projeto do processo de fabricação pode causar uma série de defeitos como deformidades, desbaste excessivo, rasgamento e enrugamento do material.

Uma vez que os componentes mecânicos estão simultaneamente sujeitos a uma combinação de fricção, desgaste e corrosão em muitas aplicações, LO *et al.* [4] salientaram que os aços inoxidáveis são normalmente utilizados devido à sua elevada resistência à corrosão. Os autores observaram que existem numerosos tipos de aços inoxidáveis no mercado sendo que cada um oferece características únicas para utilização em aplicações específicas, tais como nas indústrias alimentícia, química, médica, de construção civil, automotiva, de eletrodomésticos, etc. Os aços inoxidáveis ferríticos, assim como os aços inoxidáveis austeníticos são os mais utilizados neste contexto. Ambos são aços resistentes à corrosão, no entanto, possuem diferentes propriedades químicas, físicas e mecânicas, logo manifestam desempenho distintos. De acordo com o ISSF [5], a adição de níquel no aço AISI 304 melhora substancialmente a resistência à corrosão quando comparado ao aço AISI 430; que, por sua vez, o torna mais caro. Quando o custo é um fator mais importante do que a vida útil, o aço AISI 430 pode ser mais adequado.

EVIN *et al.* [6, 7] salientaram que a influência de apenas um único parâmetro nos processos de conformação não pode ser determinada com exatidão considerando que características específicas do material (por exemplo: textura e microestrutura) podem influenciar no seu comportamento tribológico de uma condição de contato para outra. Por conseguinte, a influência das propriedades dos materiais na conformação também varia, tornando difícil a obtenção de coeficientes de atrito exatos. A tribologia aplicada a processos de produção passou por evoluções significativas ao longo dos últimos cem anos e muitos estudos em busca do aprimoramento dos regimes de lubrificação foram realizados [6, 7]. Contudo, os efeitos que as condições de trabalho podem provocar em relação ao regime de lubrificação e à qualidade superficial dos aços inoxidáveis ainda é pouco explicada e carece de embasamento científico.

A microesclerometria, patenteada em 1994 [8], é uma técnica originalmente utilizada para mapeamento de microdureza [9] e tornou-se valiosa na caracterização mecânica de materiais metálicos. Atualmente permite além da avaliação das propriedades de dureza em escalas microscópicas, a determinação da adesão, resistência a riscos, módulo de elasticidade, atrito e desgaste.

Neste trabalho verificou-se a diferença de comportamento dos aços inoxidáveis AISI 304 e AISI 430 submetidos a diferentes condições de lubrificação, via microesclerometria. O objetivo do trabalho foi avaliar o coeficiente de atrito e a profundidade de penetração após a deformação, assim como a morfologia e demais detalhes dos riscos obtidos pelo ensaio.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Inicialmente, foram preparadas misturas de fluidos para serem usadas na lubrificação das amostras durante os ensaios de microesclerometria. A base desses fluidos foi o óleo de laminação Dairoll NS12-2AB, contaminado com óleo hidráulico Petronas Hydraulic 46 HLP e/ou água potável, nas concentrações descritas na Tabela 1. Os contaminantes, óleo hidráulico e água, foram adicionados em percentual em volume e submetidos a agitação magnética por 10 minutos. Além das misturas de fluidos, também foram utilizadas as condições dos óleos de laminação e hidráulico puros para realização dos ensaios de microesclerometria.

Foram estudados dois tipos de aços inoxidáveis: o ferrítico (430), devido ao seu baixo custo, e o austenítico (304), conhecido por sua grande versatilidade de uso. As composições químicas dos aços foram analisadas via espectroscopia de fluorescência de Raio X (FRX) e estão detalhadas na Tabela 2. Para preparar as amostras para os ensaios, foram cortadas amostras de bobinas laminadas a quente, recozidas e decapadas industrialmente. Essas amostras foram então usinadas na região do corte, resultando em peças com dimensões de 100 mm × 50 mm × 4 mm (C.L.E). Posteriormente, as amostras foram laminadas a frio em laboratório, aplicando-se uma

Tabela 1: Condição dos fluidos de lubrificação utilizados nos ensaios de microesclerometria.

CONDIÇÃO	NS12-2AB	46 HLP	ÁGUA POTÁVEL
Mistura 1 (M1)	90%	10%	–
Mistura 2 (M2)	90%	–	10%
Mistura 3 (M3)	90%	5%	5%
Óleo de Laminação (OL)	100%	–	–
Óleo Hidráulico (OH)	–	100%	–

redução de 75% até atingir a espessura final de 1,00 mm. A redução significativa foi aplicada para simular o estado de encruamento dos aços nos últimos passes de laminação, quando as condições de mecânica de contato e lubrificação se tornam mais rigorosas. Medições de dureza foram realizadas utilizando o método Vickers, com carga de 49 N. As medições de dureza foram realizadas nas amostras antes e após a laminação a frio, para comparação da dureza entre as condições do aço recozido e encruado.

Após a laminação a frio, as amostras foram preparadas para garantir uniformidade da superfície, nivelamento da amostra e facilitar a medição e observação do risco formado. Utilizando um disco abrasivo, as amostras laminadas foram seccionadas, embutidas com resina polimérica e tiveram sua superfície lixada com a seguinte sequência de lixas: #120, #220, #320 e #600. Em seguida, as superfícies foram polidas com pasta diamantada de 9, 3 e 1 µm de diâmetro.

Para compreender melhor o comportamento do contato mecânico e a influência da condição de lubrificação nos aços estudados, foram conduzidos ensaios de microesclerometria utilizando um medidor Micro Combi (MCT3) da Anton Paar, com carga máxima de 30 N. Foi utilizado um indentador Rockwell C, com ponta de diamante, raio de 800 µm e inclinação de 120°. Os ensaios foram realizados à temperatura ambiente, em um único passe, com um comprimento de risco de 3 mm e uma velocidade de riscamento de 2 mm/min. Durante esses ensaios, foram analisados o coeficiente de atrito, a profundidade de penetração e a força tangencial, aplicando cargas de 10, 20 e 30 N, com o objetivo de determinar a melhor condição para interpretação e análise dos dados. A Figura 1 mostra o equipamento utilizado para realização dos ensaios, assim como o detalhe do indentador utilizado e o exemplo de uma amostra após riscamento.

Os riscos foram executados em triplicata, sendo mais de 3000 pontos extraídos para análise, com a exclusão de 0,5 mm do início e do final de cada risco. Assim, foram calculadas a média e o erro padrão para cada condição testada, levando em consideração a carga e o lubrificante utilizado. Devido ao tamanho dos riscos de 3 mm, foi possível realizar a triplicata de cada condição de carga em uma única amostra, resultando em 9 riscos por amostra. Para essa configuração, foram necessárias 10 amostras, sendo 5 condições de lubrificação para cada tipo de aço analisado.

A superfície de todas as amostras riscadas foi submetida a uma análise detalhada por perfilometria 3D, utilizando um perfilômetro da marca Hommel Werke, modelo T8000. Foi analisada uma área de 6,00 × 5,00 mm a uma velocidade de 0,25 mm/s, totalizando 150 perfis de medição. Dessa forma foi possível obter tanto os resultados de rugosidade da superfície da amostra preparada, como também a topografia e dimensões dos riscos.

Tabela 2: Composição química dos aços 430 e 304, com o percentual em peso (%p) de cada elemento.

AÇO	Cr	Ni	C	Mn	Si	P	S	Mo	N
430	16,34	0,13	0,04	0,27	0,28	0,039	0,003	0,01	0,05
304	18,17	8,03	0,02	1,35	0,48	0,040	0,003	0,08	0,05

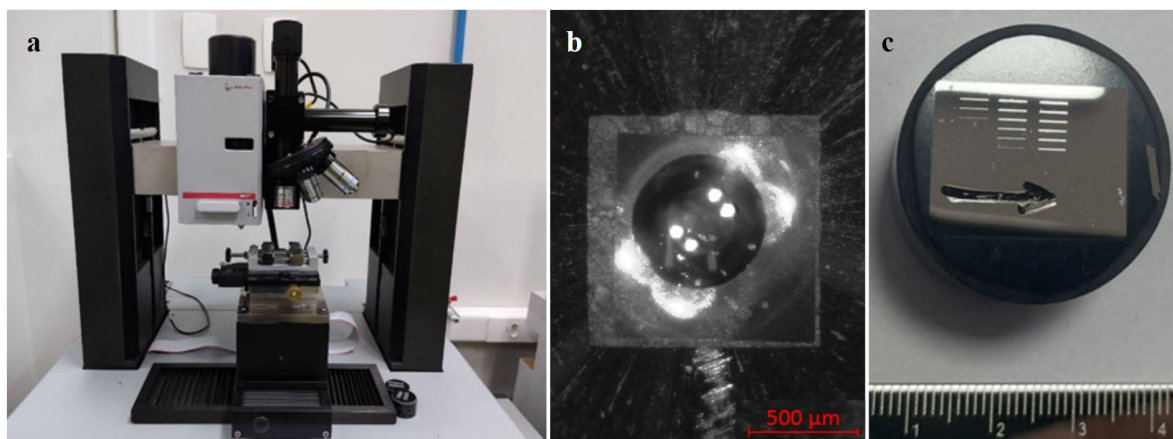


Figura 1: (a) Microesclerômetro utilizado para riscamento das amostras; (b) indentador Rockwell C; (c) exemplo de uma amostra após riscamento.

A superfície preparada das amostras e as características dos riscos foram examinadas por meio do software de análise 3D Mountains Map. Nessa análise, foram avaliadas a profundidade dos riscos e a relação entre a área do material deslocado para as bordas e a área do sulco do risco. Ademais, a superfície riscada foi investigada por microscopia eletrônica de varredura (MEV) para compreender as diferenças nos mecanismos de deformação entre os aços 304 e 430. Para essa análise, utilizou-se um MEV convencional do fabricante PHILIPS, modelo XL-30, equipado com filamento de LaB6.

Para complementar o estudo, amostras do óleo de laminação utilizado no processo industrial foram coletadas, filtradas, lavadas e secadas. A morfologia das partículas sólidas presentes no óleo de laminação foi avaliada por microscopia eletrônica de varredura (MEV), utilizando o mesmo modelo de equipamento mencionado anteriormente. Com o auxílio de um analisador de energia dispersiva de raios-X (EDS) acoplado ao MEV, a composição química das partículas foi analisada para identificar o material residual presente no óleo utilizado na indústria. As etapas da metodologia global aplicada são apresentadas na Figura 2.

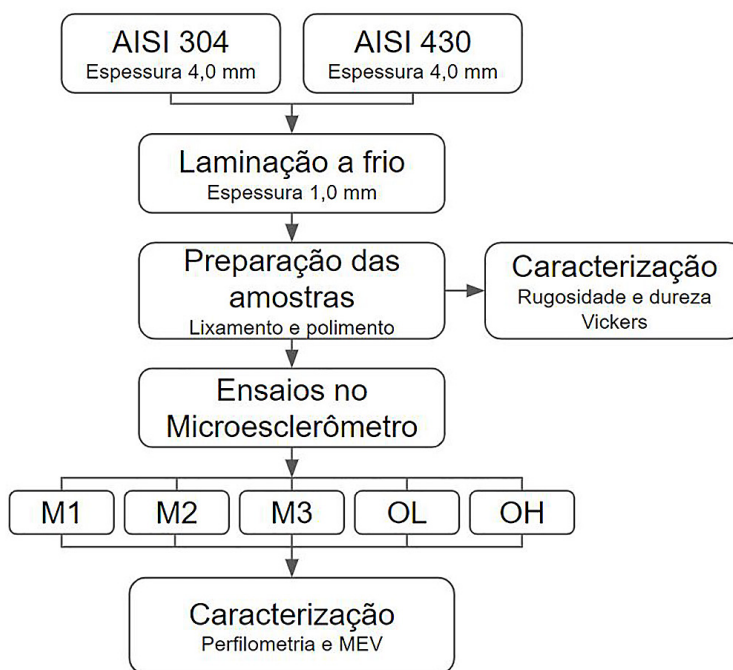


Figura 2: Fluxograma do procedimento experimental.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 3 mostra os resultados de rugosidade das amostras encruadas após preparação e também os valores de dureza Vickers obtidas para os aços recozidos e encruados. A preparação das amostras foi eficaz para reduzir e quase eliminar a rugosidade de ambos os aços, alcançando valores centesimais, entre 0,01 e 0,02 $\mu\text{m Ra}$. Dessa forma os resultados obtidos puderam ser correlacionados apenas com as propriedades de cada aço analisado individualmente, sem a influência de condição da superfície inicial.

Comparando-se os resultados de dureza Vickers dos aços como recozidos e após encruamento, é observado que os maiores valores foram obtidos para o aço 304. Como recozido, os valores de dureza mais elevados do 304 podem ser atribuídos à sua composição química, conforme mostrado na Tabela 2. O aço 304 possui maiores quantidades de elementos de liga como cromo, níquel, manganês e molibdênio, que além de proporcionar maior resistência à corrosão, também aumenta a sua resistência mecânica. Após encruado, a diferença de a diferença de dureza entre os aços aumenta significativamente, saindo de 7,1% para 40,4%.

Os valores de coeficiente de atrito, com as cargas de 10, 20 e 30 N, são mostrados na Figura 3. Em geral, há um aumento do coeficiente de atrito diretamente proporcional ao aumento da carga aplicada nas variadas condições de lubrificação, tanto para o 304 e 430. O aumento do coeficiente de atrito com a carga está relacionado ao aumento da deformação plástica, o que pode ser corroborado pelo aumento na profundidade de penetração, conforme ilustrado na Figura 4. Além disso, o aumento na profundidade de penetração leva a um maior grau de encruamento e, portanto, a forças de deformação mais elevadas [10].

Tabela 3: Resultados de dureza Vickers e rugosidade obtidos.

AÇO	RUGOSIDADE ($\mu\text{m RA}$) ENCRUADO	DUREZA (HV) RECOZIDO	DUREZA (HV) ENCRUADO	INCREMENTO DE DUREZA (%)
430	$0,0134 \pm 0,001$	179	283	36,9%
304	$0,0180 \pm 0,002$	192	475	59,5%
Diferença de Dureza 430 x 304 (%)	–	7,1%	40,4%	–

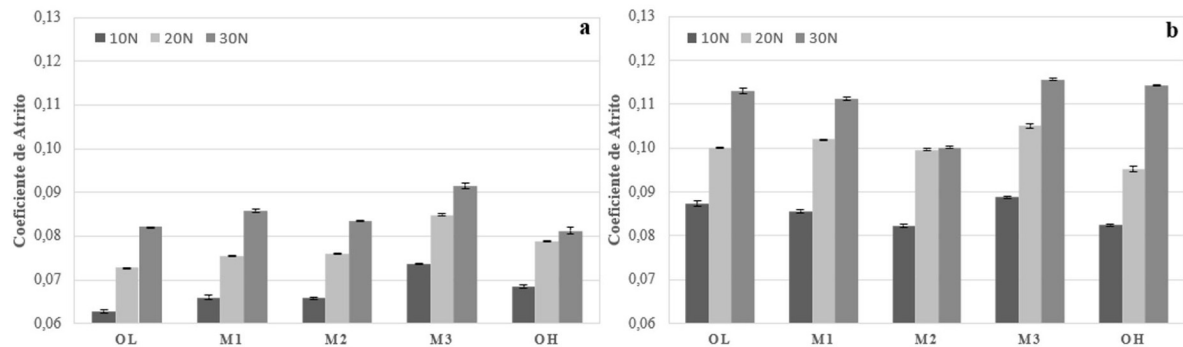


Figura 3: Coeficiente de atrito dos aços (a) 304 e (b) 430 em função da carga aplicada.

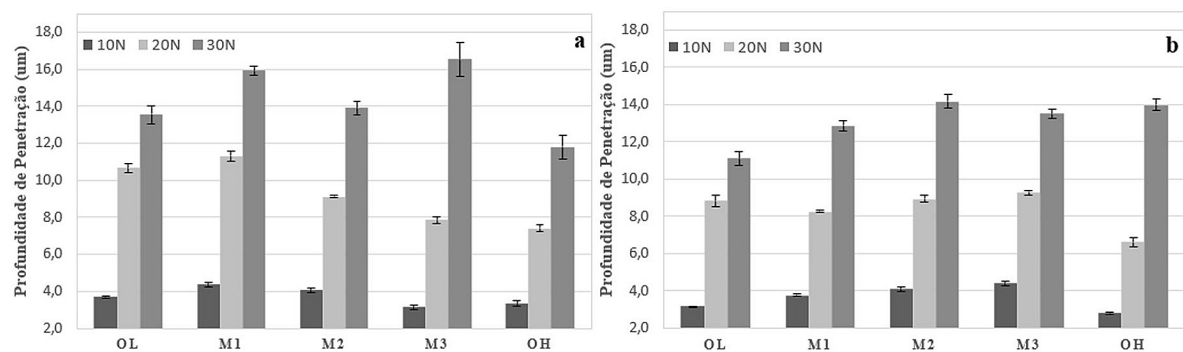


Figura 4: Profundidade de penetração de aços (a) 304 e (b) 430 em função da carga aplicada.

Uma exceção notável foi observada no caso do aço 430 (Figura 3b) quando lubrificado com a mistura 2. Sob uma carga de 30 N, não houve mudança no coeficiente de atrito em comparação com a carga de 20 N. No entanto, para cargas de 10 e 20 N, o coeficiente de atrito exibiu tendências semelhantes aos diferentes tipos de lubrificantes usados para ambos os tipos de aço.

A discrepância observada sob a carga de 30 N pode ser atribuída à utilização do limite máximo de carga do equipamento, o que potencialmente pode resultar em imprecisões nas medições. Portanto, para uma análise comparativa mais representativa do comportamento dos aços 430 e 304, apenas os dados obtidos com cargas de 10 e 20 N foram considerados nos resultados a seguir.

A Figura 5 mostra o coeficiente de atrito obtidos para os ensaios realizados com as cargas de 10 N (5a) e 20 N (5b), em função das condições de lubrificação testadas. Quando comparado o coeficiente de atrito entre o 304 e o 430, a diferença é significativamente diferente. Os resultados indicam que, sob as mesmas condições de lubrificação, os coeficientes de atrito para o aço 430 foram, em média, cerca de 23% mais elevados do que os obtidos para o aço 304. Entretanto, para a maioria das condições de lubrificação, a variação do coeficiente de atrito em relação ao lubrificante utilizado mostrou-se irrelevante, considerando cada tipo de aço isoladamente.

Os resultados de profundidade de penetração (Figura 6) demonstraram sensibilidade ao tipo de lubrificação empregado durante o riscamento, em contraste ao que foi observado nos resultados de coeficiente de atrito. Para o aço 430, o impacto da lubrificação foi menos pronunciado em comparação com o aço 304. A diferença mais notável ocorreu apenas nas condições de lubrificação com óleo hidráulico puro.

Os valores mais elevados de profundidade de penetração para o aço 304 foram alcançados na condição de lubrificação com óleo de laminação puro e na mistura 1, que envolve a adição de 10% de óleo hidráulico ao óleo de laminação.

Os gráficos apresentados na Figura 7 ilustram a relação entre a profundidade de penetração e o coeficiente de atrito para os aços 304 e 430, respectivamente. Notavelmente, para o aço austenítico, foi observado um padrão inverso entre essas variáveis: quanto menor o coeficiente de atrito, maior a profundidade de penetração.

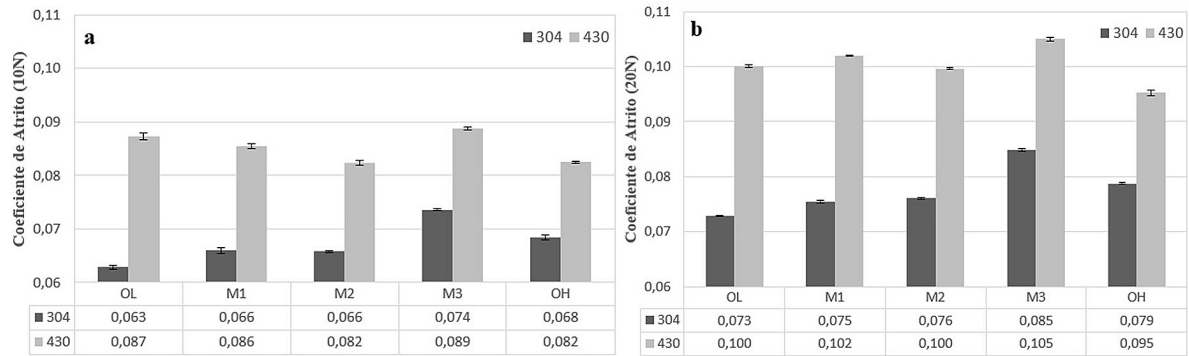


Figura 5: Resultados de coeficiente de atrito com as cargas de 10 N (a) e 20 N (b) dos aços 304 e 430 em diferentes condições de lubrificação.

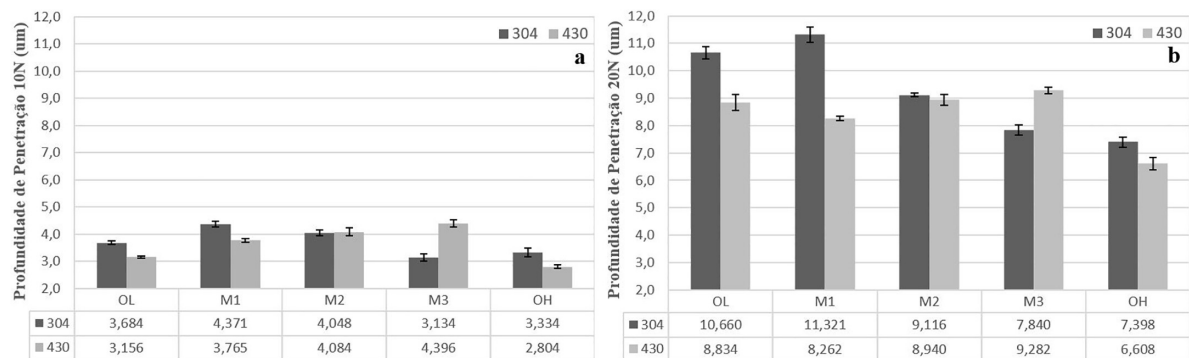


Figura 6: Profundidade de penetração dos aços 304 e 430, com as cargas de 10 N (a) e 20 N (b) em diferentes condições de lubrificação.

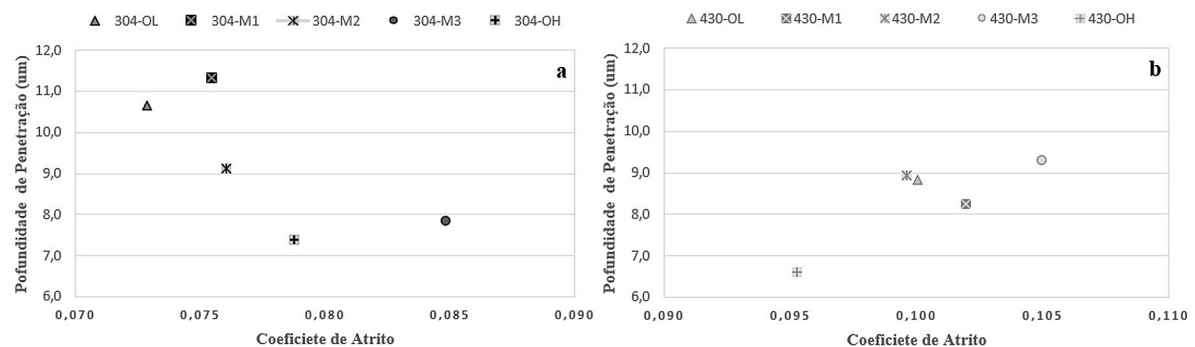


Figura 7: Correlação entre profundidade de penetração e coeficiente de atrito do 304 (a) e 430 (b) em diferentes condições de lubrificação.

Esses achados estão em conformidade com a literatura, que destaca que nos aços inoxidáveis austeníticos, a transformação da austenita metaestável em martensita durante a deformação possibilita maior alongamento em comparação com os aços ferríticos [11, 12]. De fato, é documentado na literatura que a conformabilidade superior dos aços inoxidáveis austeníticos, como o AISI 304, está relacionada à transformação da austenita metaestável em martensita induzida pela deformação [11, 12]. À medida que o coeficiente de atrito aumenta com a variação das condições de lubrificação, a profundidade de penetração diminui, o que pode ser atribuído ao aumento da fração de martensita.

Os coeficientes de atrito mais altos para o aço 304 foram registrados no contato lubrificado com as misturas M2 e M3. Quanto mais alto o coeficiente de atrito, maior é a energia dissipada no contato [13], o que pode induzir uma transformação martensítica mais significativa, resultando em uma redução na profundidade de penetração. Por outro lado, nos aços ferríticos, não há ocorrência de transformação martensítica durante a deformação plástica, levando a um aumento na deformação com o incremento do coeficiente de atrito.

LUIZ e RODRIGUES [14] demonstraram que o aço AISI 430 exibe uma maior heterogeneidade de propriedades em comparação com o aço AISI 304, resultando em um coeficiente médio de anisotropia (R) mais elevado. Isso aumenta sua resistência à estrição e, conseqüentemente, sua capacidade de deformação plana. MASTERS *et al.* [15] observaram que o coeficiente de atrito aumenta com o aumento da deformação plástica em condições de contato seco e lubrificado, devido ao aumento da rugosidade. Esse aumento na rugosidade está associado às bandas de deformação que se formam na superfície da chapa. A Figura 8 ilustra o efeito da deformação plástica na topografia da superfície das amostras submetidas ao ensaio de microesclerometria. As imagens destacam o final do risco, onde ocorre o acúmulo de material, e os detalhes da deformação localizada na borda superior dos riscos. É evidente a diferença no comportamento de deformação entre os aços, com trincas observadas nas laterais e no centro do sulco do risco de forma mais pronunciada para o aço ferrítico 430.

BHUSHAN [16] elucidou que o deslizamento relativo induz uma força de fricção (tangencial) na interface de contato, e à medida que a magnitude da tensão de cisalhamento aumenta, o coeficiente de atrito também se eleva. Nessas condições, as irregularidades dúcteis da tira sofrem deformação, resultando no achatamento dos picos, o que, por sua vez, leva ao aumento da área de contato real e da resistência ao atrito. A área de contato real é influenciada por diversos fatores, como os parâmetros de rugosidade, a força normal entre o par tribológico devido à deformação, a geometria da superfície de contato e as propriedades do material. Este último fator está associado à capacidade de endurecimento do material e exerce uma forte influência no comportamento tribológico [17].

Assim, os picos de rugosidade do material com maior capacidade de endurecimento são menos achatados pela superfície dura da ferramenta. Conseqüentemente, os vales podem reter mais lubrificante, reduzindo o atrito. Como mencionado no estudo de LUIZ e RODRIGUES [14], o aço AISI 304 exibe um coeficiente de encruamento (n) consideravelmente superior ao do aço AISI 430, o que pode ter facilitado uma lubrificação mais eficaz durante o ensaio, resultando na redução do coeficiente de atrito.

Durante o ensaio de riscamento, uma variedade de fenômenos pode ocorrer, dependendo da carga normal aplicada à amostra e das características do material em análise. De acordo com STROUD e WILMAN [18], durante a abrasão de materiais macios, apenas uma parte do desgaste gerado pelas partículas abrasivas é removida na forma de detritos, enquanto o restante é deslocado de forma plástica em direção às bordas do sulco.

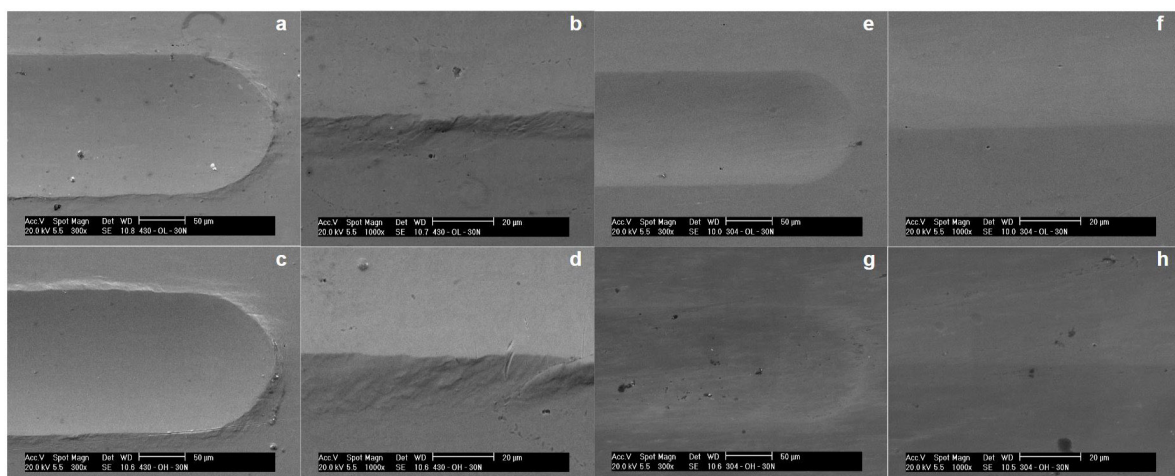


Figura 8: Imagem dos riscos de 430 (a–d) e 304 (e–h) com carga de 30 N, nas condições OL (superior) e OH (inferior). Ampliações de 300 e 100x.

Em um ensaio de riscamento com passe único, a razão entre o volume de material removido como detrito de desgaste e o volume do sulco criado pode ser descrita pela fração f_{ab} , determinada pela Equação 1 [17]:

$$f_{ab} = \frac{A_v - (A_1 + A_2)}{A_v} \tag{1}$$

Onde,

A_v : área do sulco gerado;

A_1 e A_2 : área do material deslocado para as bordas do sulco por deformação plástica.

As Figuras 9 e 10 exibem a topografia tridimensional dos riscos sob cargas de 10, 20 e 30 N, distinguindo-se pela profundidade em relação à superfície (Figuras 9a e 10a). As Figuras 8b e 9b ilustram exemplos dos perfis dos riscos extraídos da topografia, cada um associado a uma carga específica, a partir dos quais foram obtidos os valores de área para análise. Na visualização do perfil (Figuras 9b e 10b), a área em vermelho representa o sulco formado, enquanto a área em verde indica o acúmulo de material nas bordas do sulco.

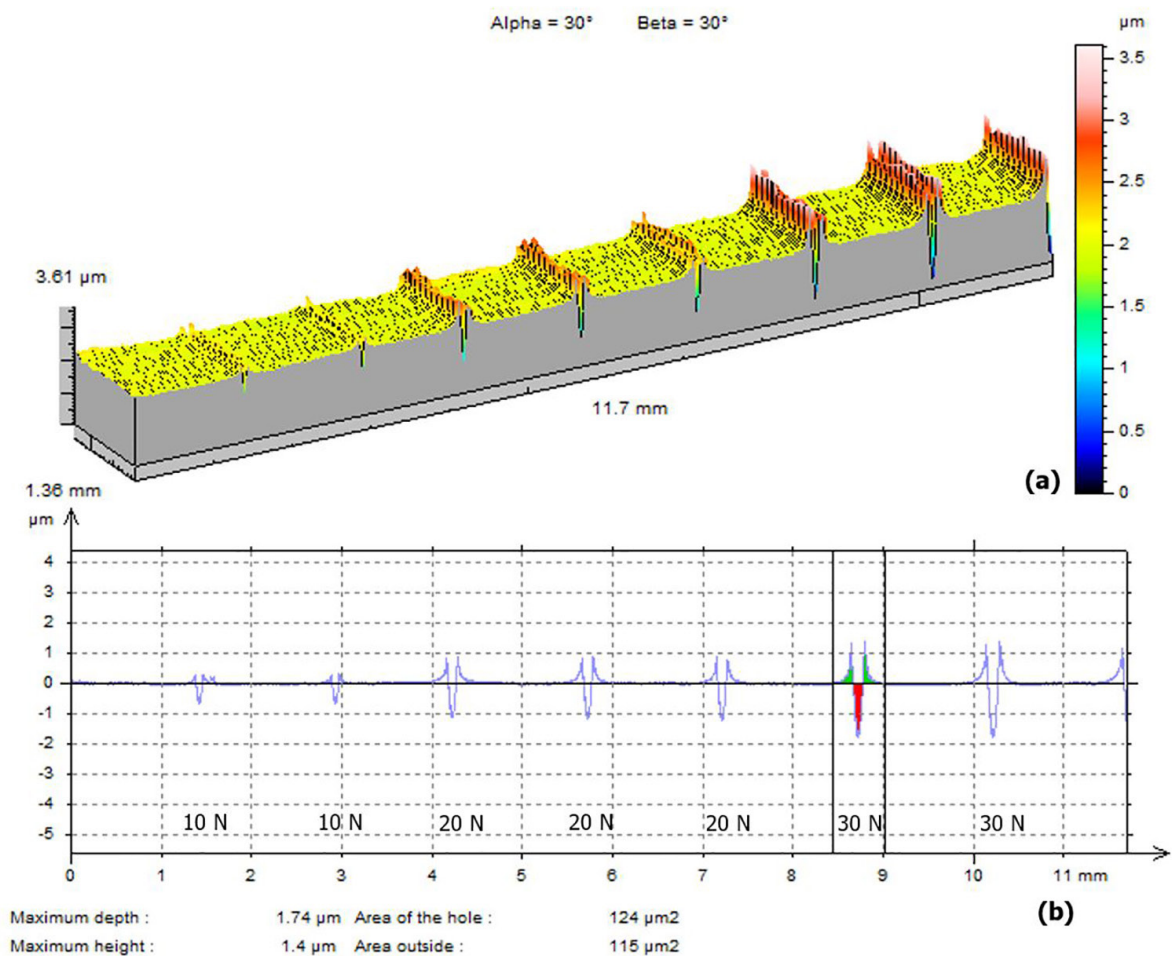


Figura 9: (a) Topografia 3D dos riscos com as diferentes cargas e (b) determinação das áreas do sulco e de material acumulado nas bordas do risco (aço 430, utilizando óleo de laminação).

A Tabela 4 sumariza os dados extraídos dos perfis para cada condição estudada, contendo os valores, a área do sulco (A_v), a área deslocada ($A_1 + A_2$) e o parâmetro f_{ab} . Observa-se que os valores da fração f_{ab} atingiram o máximo de 0,25 e 0,08 para os aços 304 e 430, respectivamente. Isso indica que, para todos os casos, houve uma remoção muito pequena de material, resultando em um microsulcamento puro, onde $f_{ab} = 0$ Ou seja, durante os ensaios de riscamento realizados não houve remoção relevante de material, ocorrendo quase que unicamente um deslocamento de material para as bordas do sulco.

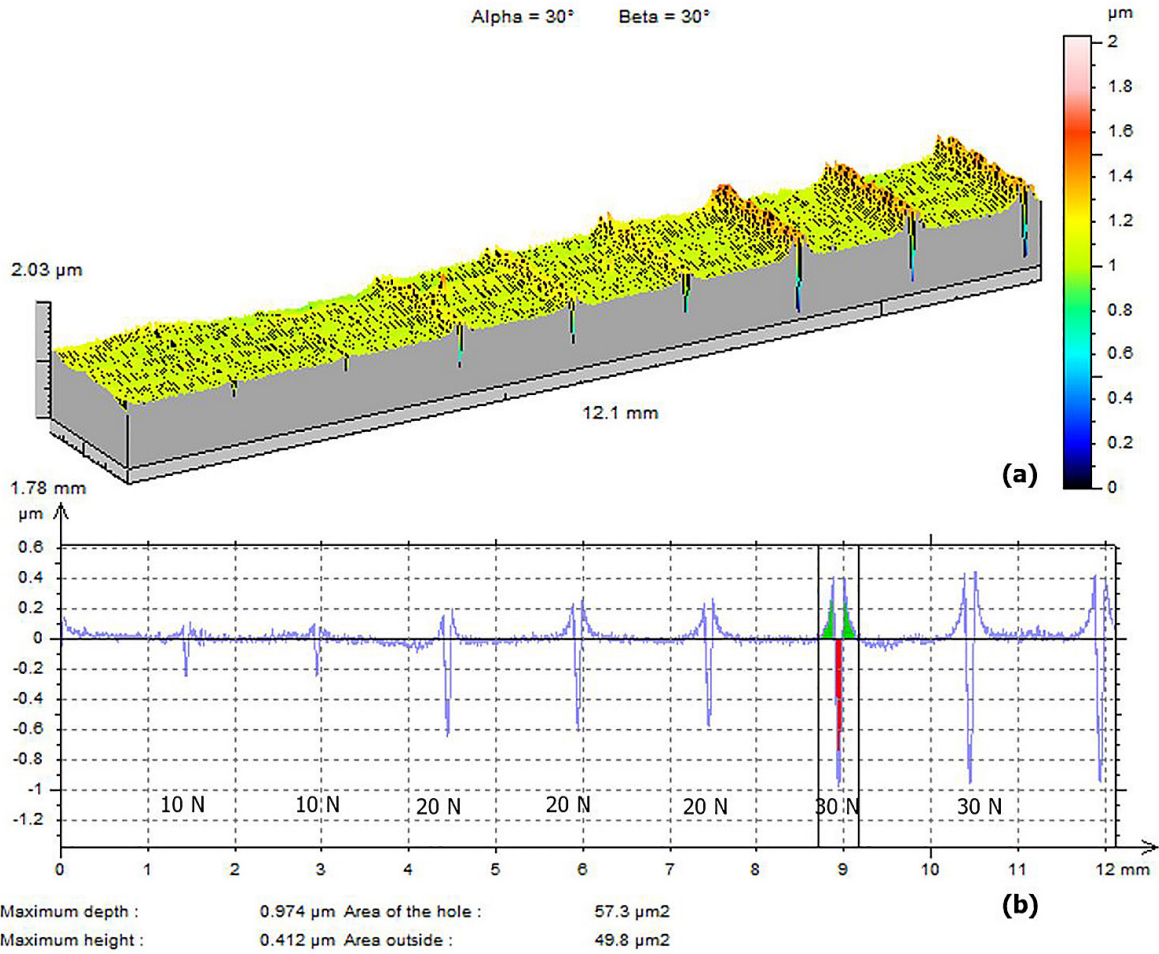


Figura 10: (a) Topografia 3D dos riscos com diferentes cargas e (b) determinação das áreas do sulco e de material acumulado nas bordas do risco (aço 304, utilizando óleo de laminação).

Tabela 4: Resultados obtidos nas análises de perfilometria.

CARGA	CONDIÇÃO	PROFUNDIDADE (μm)		A_v (μm ²)		$A_1 + A_2$ (μm ²)		f_{ab}	
		304	430	304	430	304	430	304	430
20 N	OL	0,65	1,18	27,85	70,43	20,10	76,97	0,25	0,08
	M1	0,57	1,19	27,63	68,95	24,22	90,73	0,10	-0,06
	M2	0,59	1,19	28,73	70,47	27,73	77,38	0,01	-0,09
	M3	0,60	1,18	28,62	69,70	26,85	86,70	0,01	-0,12
	OH	0,60	1,25	28,93	74,67	31,06	73,02	0,07	0,01

Conforme destacado por GAHR [19], quando $f_{ab} = 1$ ocorre o chamado microcorte puro. Nesse caso, não há deslocamento de material para as bordas do sulco; em vez disso, todo o material correspondente ao volume é removido na forma de microcavacos ou partículas de desgaste. Quando $f_{ab} > 1$, o que só ocorre em materiais frágeis, o volume de material retirado como partículas de desgaste excede o volume teórico do sulco.

A Figura 11 representa graficamente o parâmetro f_{ab} . Em relação à condição de lubrificação, os aços 430 e 304 demonstram tendências semelhantes. No entanto, há uma clara inclinação para uma remoção de material maior no aço AISI 304. Esses resultados estão alinhados com a literatura, que indica uma maior propensão à perda de peso do 304 em comparação com o 430 em processos de deformação a frio com contato lubrificado [20].

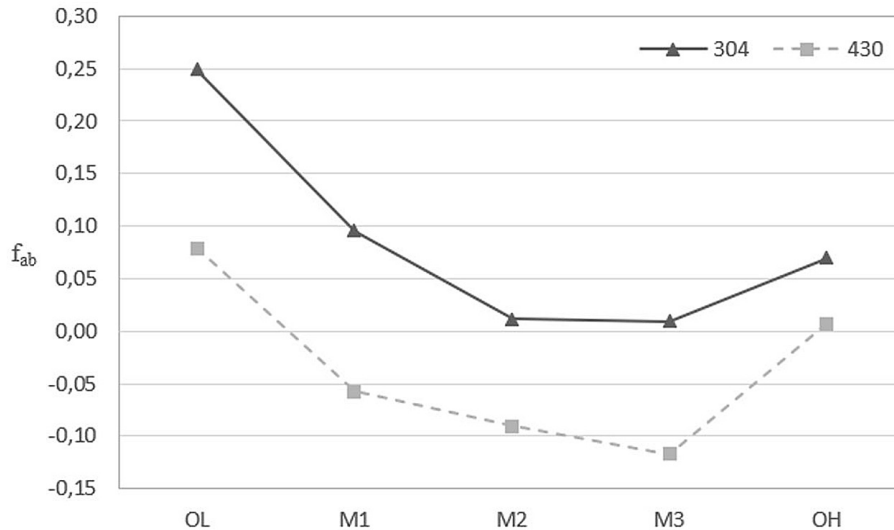
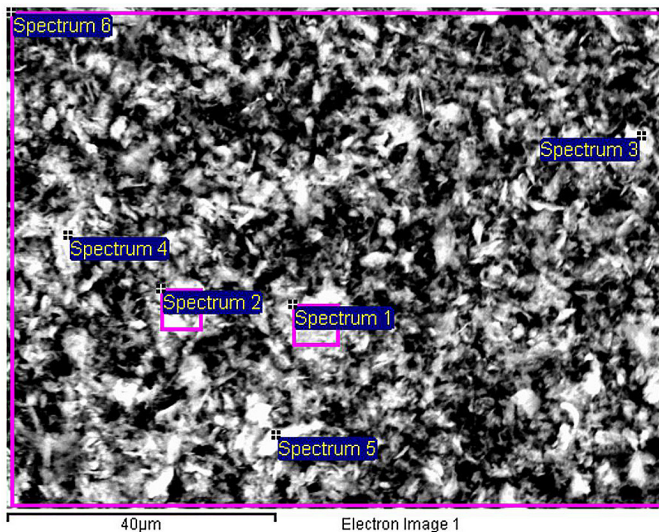


Figura 11: Variação de f_{ab} de acordo com o tipo de lubrificante, para a carga de 20 N.



Espectro	Cr	Mn	Fe	Ni
P1	17,60	-	74,87	7,53
P2	17,24	-	74,09	8,67
P3	17,09	1,58	72,46	8,87
P4	16,11	1,50	74,72	7,66
P5	16,77	1,19	73,21	8,82
P6	16,63	-	78,15	5,23

Figura 12: Partículas metálicas presentes no resíduo do óleo de laminação de um processo laminação industrial a frio de aço inoxidável: morfologia e análise química via EDS.

A morfologia das partículas removidas do resíduo de óleo de laminação utilizado em um processo industrial de laminação a frio de aços inoxidáveis é mostrada na Figura 12. A análise química revela um alto teor de Ni (em média, 8%), o que está associado à produção significativa de detritos de aços austeníticos durante a laminação a frio. O processo industrial abrange a laminação de uma ampla gama de aços, incluindo os ferríticos e austeníticos. No entanto, os resultados da análise química confirmam uma maior propensão à remoção do AISI 304 durante os processos de conformação com contato lubrificado [20].

4. CONCLUSÕES

Nos ensaios de microesclerometria conduzidos com cargas de 10 e 20 N, os resultados do coeficiente de atrito e da profundidade de penetração seguiram a mesma tendência, com variações sutis de acordo com o lubrificante utilizado, especialmente a mistura 3 e o óleo hidráulico. Por outro lado, nos ensaios realizados com carga de 30 N, houve uma oscilação na tendência dos resultados, principalmente quando a mistura 2 foi utilizada como lubrificante. Essa variação ocorreu, possivelmente, devido à carga de 30 N atingir o limite máximo do equipamento, diminuindo a confiabilidade dos testes. Portanto, os dados deste estudo foram baseados nos resultados obtidos com uma carga de 20 N. Em termos de lubrificação, as condições testadas não influenciaram significativamente

os resultados de coeficiente de atrito. Diferenças relevantes foram observadas somente nos resultados de profundidade de penetração.

Os aços AISI 304 e AISI 430 demonstraram comportamentos tribológicos distintos, sendo que o coeficiente de atrito do aço 430 foi cerca de 23% maior que o do 304. O aço 304 passa por uma transformação martensítica durante a deformação plástica, dificultando o achatamento dos picos de rugosidade, o que possibilita um maior armazenamento de lubrificante nos vales da superfície e, conseqüentemente, reduzindo o atrito.

A profundidade de penetração foi maior no aço 304, também devido à transformação da austenita metaestável em martensita por deformação, o que possibilita maior alongamento do material do que o observado em aços ferríticos.

Na análise dos riscos por meio de perfilometria, verificou-se que tanto o aço 304 quanto o 430 apresentaram tendências semelhantes nas diferentes condições de lubrificação. Observou-se uma maior remoção de material para o óleo de laminação, seguido pelo óleo hidráulico, mistura 1, mistura 2 e mistura 3, respectivamente.

Os valores de f_{ab} , que expressa a relação entre o volume do sulco e o volume de material removido, foram baixos ($f_{ab} < 1$). Isso indica que durante os ensaios de riscamento realizados, não houve uma remoção significativa de material, ocorrendo quase que exclusivamente um deslocamento de material para as bordas do sulco.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores são gratos à empresa Aperam South America em função do fornecimento materiais e disponibilização dos equipamentos utilizados para realização deste trabalho.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] GRONOSTAJSKI, Z., PATER, Z., MADEJ, L., *et al.*, “Recent development trends in metal forming”, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, v. 19, n. 3, pp. 898–941, 2019. doi: <http://doi.org/10.1016/j.acme.2019.04.005>.
- [2] TRZEPIECIŃSKI, T., “Recent developments and trends in sheet metal forming”, *Metals*, v. 10, n. 6, pp. 779, Jun. 2020. doi: <http://doi.org/10.3390/met10060779>.
- [3] SIGVANT, M., PILTHAMMAR, J., HOL, J., *et al.*, “Friction in sheet metal forming: influence of surface roughness and strain rate on sheet metal forming simulation results”, *Procedia Manufacturing*, v. 29, pp. 512–519, 2019. doi: <http://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.169>.
- [4] LO, K.H., SHEK, C.H., LAI, J., “Recent developments in stainless steels”, *Materials Science and Engineering R Reports*, v. 65, n. 4–6, pp. 39–104, Apr. 2009. doi: <http://doi.org/10.1016/j.mser.2009.03.001>.
- [5] INTERNATIONAL STAINLESS STEEL FORUM, *The ferritic solution*, https://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/ISSF_The_Ferritic_Solution_English.pdf, acessado em dezembro de 2023.
- [6] EVIN, E., NÉMETH, S., VYROSTEK, M., “Evaluation of friction coefficient of stamping”, *Acta Mechanica Slovaca*, v. 18, n. 3–4, pp. 20–27, 2014. doi: <http://doi.org/10.21496/ams.2014.027>.
- [7] EVIN, E., TOMÁŠ, M., VÝROSTEK, M., “Verification the numerical simulation of the strip drawing test by its physical model”, *Acta Mechanica Slovaca*, v. 20, n. 1, pp. 14–21, 2016. doi: <http://doi.org/10.21496/ams.2016.003>.
- [8] OLIVER, W.C., BLAU, P.J., *Scanning micro-sclerometer*, United States, Patente, 1994.
- [9] BLAU, P.J., OLIVER, W.C., SNEAD, L., “The scanning micro-sclerometer: a new method for scratch hardness mapping”, *Tribology International*, v. 30, n. 7, pp. 483–490, Jul. 1997. doi: [http://doi.org/10.1016/S0301-679X\(97\)00011-X](http://doi.org/10.1016/S0301-679X(97)00011-X).
- [10] FERREIRA, F.M., “Avaliação tribomecânica via esclerometria retilínea e endentação instrumentada do aço ABNT 8550”, Tese de M.Sc., Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil, 2010.
- [11] GONZALEZ, B.M., CASTRO, C.S.B., BUONO, V.T.L., *et al.*, “The influence of copper addition on the formability of AISI 304 stainless steel”, *Materials Science and Engineering A*, v. A343, n. 1–2, pp. 51–56, 2003. doi: [http://doi.org/10.1016/S0921-5093\(02\)00362-3](http://doi.org/10.1016/S0921-5093(02)00362-3).
- [12] LLEWELLYN, D.T., “Work hardening effects in austenitic stainless steels”, *Materials Science and Technology*, v. 13, n. 5, pp. 389–400, 1997. doi: <http://doi.org/10.1179/mst.1997.13.5.389>.

- [13] LABIAPARI, W.S., ARDILA, M.A.N., COSTA, H.L., *et al.*, “Microabrasion-corrosion of ferritic stainless steels”, *Wear*, v. 376, pp. 1298–1306, 2017. doi: <http://doi.org/10.1016/j.wear.2017.01.083>.
- [14] LUIZ, V.D., RODRIGUES, P.C.M., “Design of a tribo-simulator for investigation of the tribological behavior of stainless-steel sheets under different contact conditions”, *Materials Research*, v. 25, e20210220, 2022. doi: <http://doi.org/10.1590/1980-5373-mr-2021-0220>.
- [15] MASTERS, I.G., WILLIAMS, D.K., ROY, R., “Friction behaviour in strip draw test of pre-stretched high strength automotive aluminium alloys”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, v. 73, pp. 17–24, 2013. doi: <http://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2013.05.002>.
- [16] BHUSHAN, B., *Introduction to tribology*, 2 ed., New York, John Wiley & Sons, 2013. doi: <http://doi.org/10.1002/9781118403259>.
- [17] TRZEPIECINSKI, T., “A study of the coefficient of friction in steel sheets forming”, *Metals*, v. 9, n. 9, pp. 998, 2019. doi: <http://doi.org/10.3390/met9090988>.
- [18] STROUD, M.F., WILMAN, H., “The proportion of the groove volume removed as wear in abrasion of metals”, *British Journal of Applied Physics*, v. 13, n. 4, pp. 173–178, 1962. doi: <http://doi.org/10.1088/0508-3443/13/4/312>.
- [19] GAHR, K.H.Z., *Microstructure and wear of materials*, Amsterdam, Elsevier Science Publishers, pp. 132–167, 1987.
- [20] LABIAPARI, W.S., DE ALCÂNTARA, C.M., COSTA, H.L., *et al.*, “Wear debris generation during cold rolling of stainless steels”, *Journal of Materials Processing Technology*, v. 223, pp. 164–170, 2015. doi: <http://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.03.050>.