

AValiação DA USINABILIDADE DE UM AÇO DE LIVRE CORTE DE ALTA RESISTÊNCIA COM ADIÇÃO DE MnS

João Paulo Coutinho Mutiz, joao.mutiz@edu.ufes.br¹
Evandro Falcão Della Valentina de Oliveira, evandro.f.oliveira@edu.ufes.br¹
Mariane Gonçalves de Miranda Salustre, mariane.miranda@edu.ufes.br¹
Patrícia Alves Barbosa, patricia.a.barbosa@ufes.br¹
Marcelo Bertotele Carneiro, marcelo.b.carneiro@ufes.br¹

¹Universidade Federal do Espírito Santo, Departamento de Engenharia Mecânica, CEP 29075-910, Vitória/ES

Resumo. Usinabilidade determina a capacidade de usinagem de um material em relação a outro, influenciando o desgaste da ferramenta, a força de corte e o acabamento superficial da peça. Não é uma propriedade intrínseca do material, pois os resultados podem variar conforme o índice de avaliação escolhido. Para aprimorar a usinabilidade, fabricantes adicionam elementos de liga aos aços, criando aços de alta usinabilidade, conhecidos como aços de livre corte. Este estudo avalia a usinabilidade um aço de livre corte de alta resistência com adição de MnS, comparando sua microestrutura, dureza, e força de usinagem com um aço ABNT 1020. A análise metalográfica revelou uma matriz perlítica para o aço de livre corte com MnS e uma matriz ferrítica no aço ABNT 1020. A dureza Vickers do aço de livre corte foi 78,6% maior do que a do aço ABNT 1020, porém, em média a força de usinagem foi 34,4% menor. Os resultados indicaram que um aço de livre corte, mesmo com uma microestrutura perlítica, pode apresentar uma melhor usinabilidade do que um aço-carbono comum de matriz ferrítica.

Palavras chave: Usinabilidade. Aço de livre corte. Dureza. Força de usinagem.

Abstract. Machinability determines the machining capability of a material relative to another, influencing tool wear, cutting force, and surface finish of the workpiece. It is not an intrinsic property of the material, as results may vary depending on the evaluation index. To enhance machinability, manufacturers add alloying elements to steel, creating high-machinability steels known as free-cutting steels. This study evaluates the machinability of a high-strength free-cutting steel with added MnS, comparing its microstructure, hardness, and machining force with an ABNT 1020 steel. Metallographic analysis reveals a perlitic matrix for free-cutting steel with MnS addition and a ferritic matrix for the ABNT 1020 steel. The Vickers hardness for free-cutting steel was 78.6% higher than the ABNT 1020 steel; however, the mean machining force was 34.4% lower. The results indicated that a free-cutting steel, even with a perlitic matrix, can present better machinability than a common carbon-steel with ferritic matrix.

Keywords: Machinability. Free-cutting steel. Hardness. Machining force.

1. INTRODUÇÃO

Segundo Arfeld e Hanum (1977), a usinabilidade expressa um conjunto de propriedades de usinagem de um material em comparação a um outro, incluindo a vida da ferramenta de corte, força de usinagem e acabamento superficial. Ferraresi (2018) destaca a usinabilidade como uma grandeza tecnológica, indicando a facilidade ou dificuldade de se usar um material em relação a um outro de referência. Trent e Wright (2000), adicionalmente, reforçam o conceito de que a usinabilidade pode ser influenciada pela operação de corte, material da ferramenta e índices de avaliação utilizados. Salientam que a usinabilidade não é uma propriedade intrínseca do material da peça.

Os fabricantes de aços buscam aprimorar a usinabilidade dos seus produtos através da adição de elementos de liga como enxofre (S), selênio (Se), telúrio (Te), bismuto (Bi), chumbo (Pb), estanho (Sn), fósforo (P), e nitrogênio (N), melhorando significativamente a eficiência da usinagem. Em particular, a adição de S tende a formar inclusões não metálicas de sulfeto de manganês (MnS), que são insolúveis no aço. Estas tornam o cavaco mais quebradiço, podendo melhorar o acabamento da peça, além de atuar como lubrificante sólido na interface cavaco-ferramenta, reduzindo o desgaste da ferramenta (Diniz; Marcondes; Coppini, 2014; Xie *et al.*, 2020).

Desaigues e outros (2016) citam que estudar usinabilidade tem importância econômica, uma vez que o custo de usinagem pode representar até 65% do valor da peça. Além disso, o Pb é um dos principais elementos de livre corte utilizados na siderurgia. Todavia, devido a sua toxicidade, ele está sendo banido e outros elementos precisam ser testados (Li; Wu, 2010; Xie *et al.*, 2020).

O objetivo deste trabalho se concentra na avaliação da usinabilidade de um aço de livre corte de alta resistência, com adição de sulfeto de manganês (MnS), em comparação com o aço ABNT 1020. Para tanto, os índices de usinabilidade microestrutura e dureza, ambos fatores metalúrgicos, além de força de usinagem foram considerados.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O material utilizado neste estudo foi um aço similar ao ABNT C11XX, com adições de enxofre (S) e manganês (Mn) em quantidade suficientes para formar inclusões de sulfeto de manganês (MnS). Adicionalmente, este aço é caracterizado por possuir alta resistência mecânica. O material foi recebido em forma de barra redonda com, aproximadamente, 400 mm de comprimento e 25 mm de diâmetro. As características do aço com adição de MnS foram comparadas com a do aço ABNT 1020. Este último, também foi recebido em forma de barra redonda e nas mesmas dimensões. Nas Tabelas 1 e 2 têm-se a composição dos principais elementos químicos em massa contidos nos materiais de trabalho.

Tabela 1. Composição química do aço com adição de MnS (Desaigues et al., 2016)

C [%]	Mn [%]	Si [%]	Cr [%]	Cu [%]	P [%]	S [%]
0,46	1,517	0,23	0,12	0,13	0,01	0,30

Tabela 2. Composição química do aço ABNT 1020 (ABNT NBR NM 87:2000, 2004)

C [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]
0,18-0,23	0,30-0,60	<0,04	<0,05

Para a etapa de caracterização da microestrutura e avaliação da dureza foi executado a preparação metalográfica dos materiais de trabalho. Para tanto, uma amostra de aproximadamente 10 mm de espessura foi retirada da seção transversal, utilizando uma serra de fita horizontal (ERGOP), conforme é ilustrado na Fig. 1.

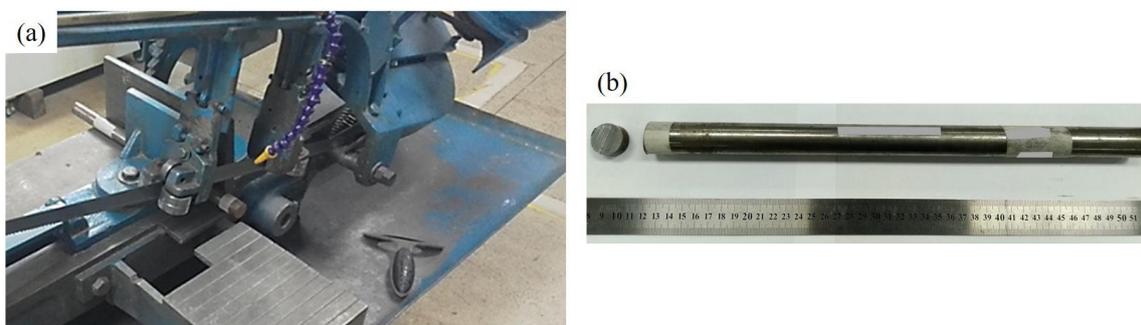


Figura 1. Seccionamento de amostra. (a) Barra de aço sendo seccionada na serra fita horizontal; (b) Amostra seccionada

Uma cortadora metalográfica CPT-25 (TECLAGO) foi utilizada para seccionar as amostras em quatro partes. Em seguida, as amostras foram embutidas à quente em uma embutidora metalográfica manual EFD 30 (FORTEL), utilizando resina fenólica, para evidenciar seções transversais e seções longitudinais, ver Fig. 2.



Figura 2. Preparação metalográfica. (a) Corte na cortadora de precisão; (b) Embutimento na embutidora metalográfica; (c) Seções das amostras embutidas, seção transversal e longitudinal

Com as amostras embutidas, elas foram lixadas com lixas de SiC e polidas com pastas diamantadas de 30 até 1/4 μm , em pano de polimento PSA (Buehler). Para tanto, foi utilizado uma lixadeira e politriz PLFDV (FORTEL), conforme é ilustrado na Fig. 3 (a).

Um par de amostras polidas em diferentes seções (transversal e longitudinal) foram utilizadas para revelar a microestrutura após ataque com Nital na concentração de 2% por 10 s. Assim, um microscópio óptico Nexius Zoom (EUROMEX) foi utilizado. O outro par de amostras foi utilizado para realizar ensaio de dureza Vickers em conformidade com a norma ASTM E92-17 (2017). Para tanto, um durômetro 200HBRV-187.5S (LLEIDA), com carga de trabalho de 30 kgf foi utilizado. O equipamento está ilustrado na Fig. 3 (b). A microestrutura e a dureza são fatores metalúrgicos que influenciam na usinabilidade dos materiais, assim justifica-se a sua avaliação.

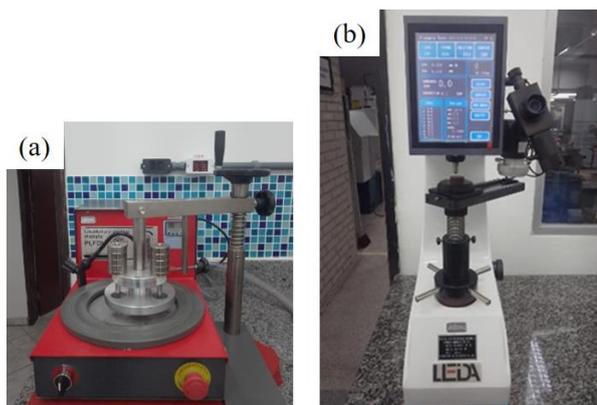


Figura 3. Equipamentos. (a) Lixadeira e politriz PLFDV (FORTEL); (b) Durômetro 200HBRV-187.5S (LLEIDA)

Finalmente, os ensaios de usinagem foram realizados em um torno CNC Centur 35D (ROMI) de 3000 rpm e 11 kW. Insertos de metal duro sem revestimento, com especificação TPUN 160304, classe BA 55 (BRASSINTER) ou classe ISO P25-P45, foram utilizados. As ferramentas foram montadas em um suporte CTGPR 2525M16 (Sandvik) com geometria de corte: ângulo de posição primário (χ_r) de 91°, ângulo de saída (γ_o) de 6°, ângulo de folga (α_o) de 5° e ângulo de inclinação (λ_s) 0°. Essa geometria com $\chi_r = 91^\circ$ e $\lambda_s = 0^\circ$ configura um corte semi-ortogonal, que é uma aproximação do corte ortogonal ideal, e que se justifica por ser uma simplificação para investigações de fenômenos de usinagem (Trent; Wright, 2000; Shaw, 2005). Como índice de usinabilidade foi avaliada a resposta força de usinagem (F_u), que é a resultante de componentes ortogonais medidas por um dinamômetro, Eq. (1). Para tanto, utilizou-se um dinamômetro modelo 9129 AA, amplificador 5080A103001, sistema de aquisição 5697A1 e software de análise Dynoware (KISTLER). Na Figura 4 tem-se uma ilustração do torno e do aparato para medição de força.

$$F_u = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (1)$$

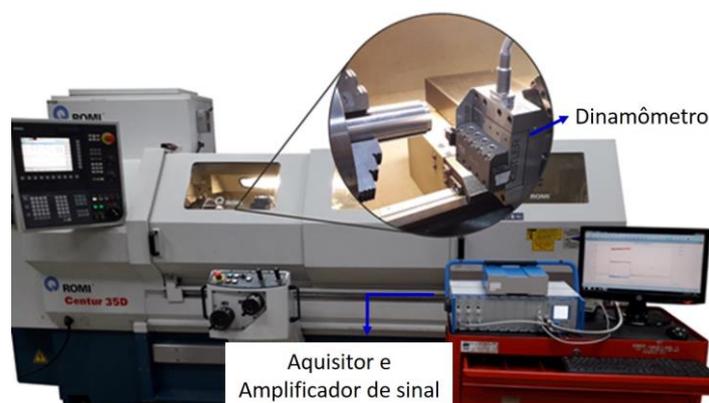


Figura 4. Torno CNC Centur 35D (ROMI) e sistema dinamométrico (KISTLER)

Devido ao pequeno diâmetro das barras (25,4 mm) e limitação de rotação da máquina-ferramenta, a velocidade de corte (v_c) e a profundidade de corte (a_p) foram fixadas em 150 m/min e 1 mm, respectivamente. O avanço (f) foi variado em 0,1, 0,2 e 0,3 mm/volta. As barras foram preparadas para ter comprimento de 200 mm, sendo que o percurso de avanço (L_f) para cada condição de corte foi de 15 mm. Os testes foram executados com as barras 50 mm em balanço a partir das

faces das castanhas de fixação. Um teste e duas réplicas foram executados para cada condição de corte, sempre utilizando uma aresta de corte nova.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 5 tem-se imagens de microscopia óptica para as seções transversal e longitudinal das amostras de aço de livre corte com adição de MnS e aço ABNT 1020. Nota-se na Figura 5 (a) as inclusões de MnS em formato arredondado, dispersas na seção transversal da amostra, que por sua vez possui uma microestrutura com matriz perlítica. Na Figura 5 (b) tem-se a seção longitudinal da amostra com as inclusões deformadas na horizontal, indicando o sentido laminação. Na Figura 5 (c) tem-se a microestrutura da seção transversal do aço ABNT 1020, em que se nota uma matriz ferrítica (contraste mais claro) e presença de perlita (contraste escuro). Na Figura 5 (d) tem-se a seção longitudinal, em que se nota a fase perlítica deformada na direção horizontal.

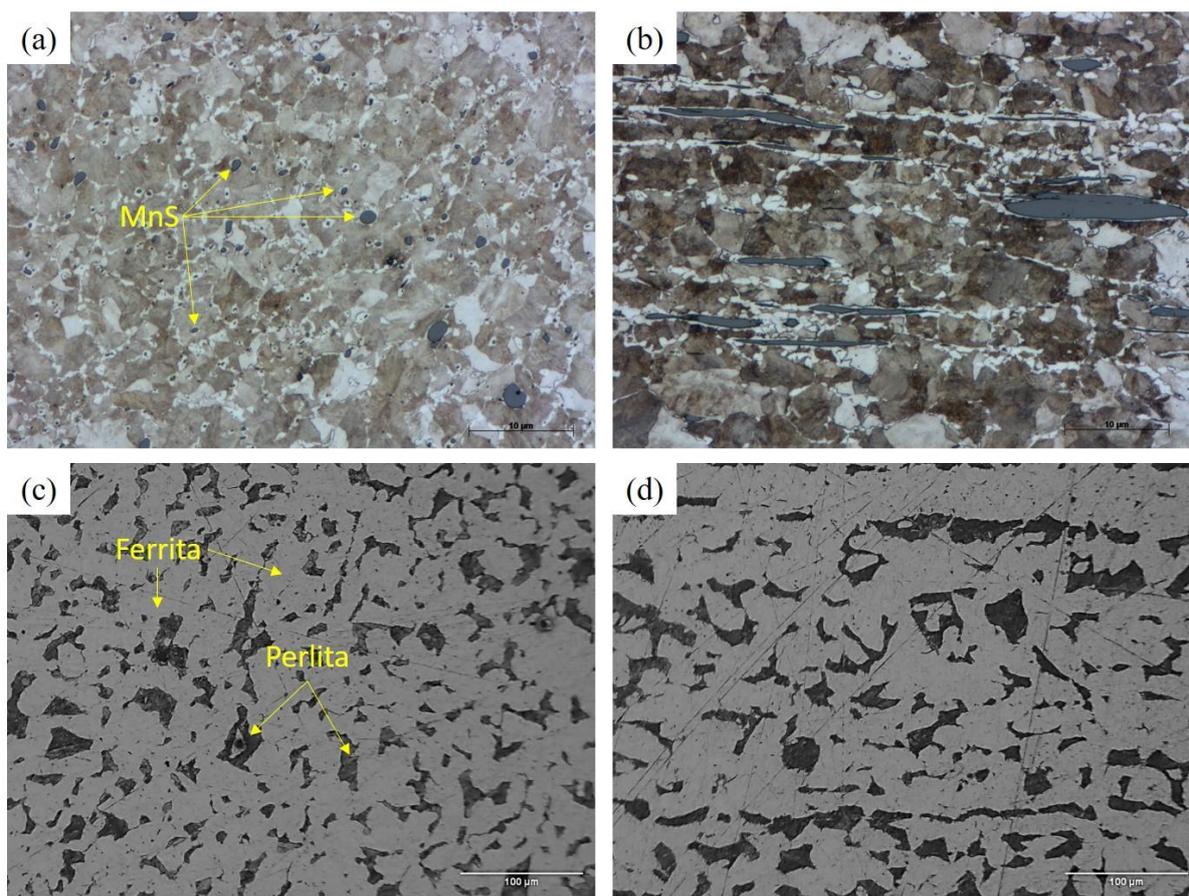


Figura 5. Microestrutura. (a) Seção transversal do aço com adição de MnS; (b) Seção longitudinal do aço com adição de MnS; (c) Seção transversal do aço ABNT 1020; (d) Seção longitudinal do aço ABNT 1020

Na Tabela 3 tem-se os resultados de dureza Vickers (HV) para o aço de livre corte com adição de MnS. A seção transversal e longitudinal apresentaram dureza média de 328,7 HV30 e 317,0 HV30, respectivamente.

Na Tabela 4 tem-se os resultados do número de dureza Vickers (HV) para o aço ABNT 1020. A seção transversal e longitudinal apresentaram dureza média de 185,0 HV30 e 176,4 HV30, respectivamente.

Tabela 3. Resultado de dureza Vickers (HV30) para o aço de livre corte com adição de sulfeto de manganês (MnS)

Amostras Aço MnS			
Seção transversal		Seção Longitudinal	
Dureza Vickers [HV30]		Dureza Vickers [HV30]	
Média	328,7	Média	317,0
Desvio padrão	6,4	Desvio padrão	4,7

Tabela 4. Resultado de dureza Vickers (HV30) para o aço ABNT 1020

Amostras Aço ABNT 1020			
Seção transversal		Seção Longitudinal	
Dureza Vickers [HV30]		Dureza Vickers [HV30]	
Média	185,0	Média	176,4
Desvio padrão	2,0	Desvio padrão	2,7

Em média a dureza na seção transversal para o aço de livre corte com adição de MnS foi 3,7% maior do que na seção longitudinal. Enquanto que o aço ABNT 1020 teve em média a dureza na seção transversal 4,9% maior do que na longitudinal.

Na Tabela 5 tem-se os valores médios e desvio padrão de dureza Vickers desconsiderando as seções.

Tabela 5. Valores médios e desvio padrão de dureza Vickers para os materiais avaliados

Materiais	HV30
Aço de livre corte com MnS	322,8 ± 8,2
Aço ABNT 1020	180,7 ± 5,0

Na Figura 6 observa-se a comparação entre as médias de dureza Vickers para o aço de livre corte com adição de MnS e ABNT 1020. Nota-se que em média a dureza do aço com MnS é 78,6% maior do que o ABNT 1020. Essa diferença se deve aos elementos químicos presentes no aço de livre corte que influencia para a formação de uma microestrutura predominantemente perlítica.

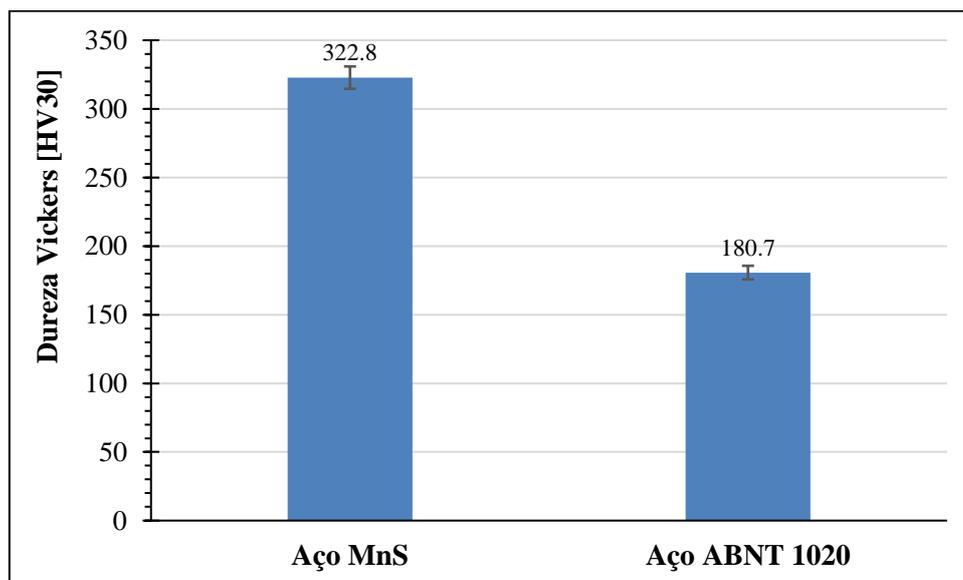


Figura 6. Valores médios e desvio padrão de dureza Vickers para os aços com adição de MnS e ABNT 1020

Na Tabela 6 tem-se os resultados médios de força de usinagem (F_u) em diferentes avanços para os materiais avaliados.

Tabela 6. Resultados de força de usinagem para os materiais avaliados

Materiais	Força de usinagem [N]			Média
	f = 0,1 mm/volta	f = 0,2 mm/volta	f = 0,3 mm/volta	
Aço MnS	248,21 ± 30,11	581,29 ± 48,66	570,84 ± 23,50	466,78
Aço ABNT 1020	433,74 ± 16,33	687,61 ± 40,35	1014,34 ± 23,35	711,90

Na Figura 7 tem-se os resultados médios do índice de usinabilidade F_u para os materiais avaliados em função do avanço (f), sendo que as barras verticais representam o desvio-padrão. Nota-se que com o aumento de f, de maneira geral, tem-se um aumento na F_u para ambos os materiais. Isso se deve ao aumento da seção transversal de corte, que implica em aumento das áreas dos planos de cisalhamento primário e secundário durante a formação do cavaco e,

consequentemente, aumento da força resultante F_u (Diniz; Marcondes; Coppini 2014; Machado *et al.*, 2015). Do menor para o maior avanço testado, a F_u foi maior para o aço ABNT 1020 em 74,7%, 18,3% e 77,7%, respectivamente. Em média, a F_u para o aço com adição de MnS foi 34,4% menor do que a do aço ABNT 1020. Isso se deve ao efeito da adição dos elementos de livre corte na forma de inclusão, que favorece a fratura do cavaco, diminuindo o comprimento de contato na interface cavaco-ferramenta (Diniz; Marcondes; Coppini, 2014; Varghese; Aravind; Shunmugesh, 2017). Um outro fator a ser mencionado é o efeito de lubrificação que os elementos de livre corte podem proporcionar na interface cavaco-ferramenta (Ramanujachar; Subramanian, 1996; Tanaka *et al.*, 2007). Considerando o aço com adição de MnS e os valores médios de F_u com os respectivos desvios-padrão, nota-se que para os avanços de 0,2 e 0,3 mm/volta o valor médio de F_u são iguais. Esse resultado, provavelmente, também é reflexo da fratura do cavaco para uma determinada tensão limite e/ou efeito lubrificação na interface cavaco-ferramenta. Até o $f = 0,2$ mm/volta a F_u aumenta para o aço MnS, a partir de 0,2 até 0,3 mm/volta a força se mantém constante, porém para o aço ABNT 1020 a força continua a aumentar, por isso que a grande diferença entre o aço ABNT e MnS no maior avanço. A menor diferença entre os materiais no $f = 0,2$ mm/volta pode estar associado ao volume de material cisalhado (cavaco), temperatura, tensões atuantes para promover a fratura do cavaco, bem como condições de interface cavaco-ferramenta.

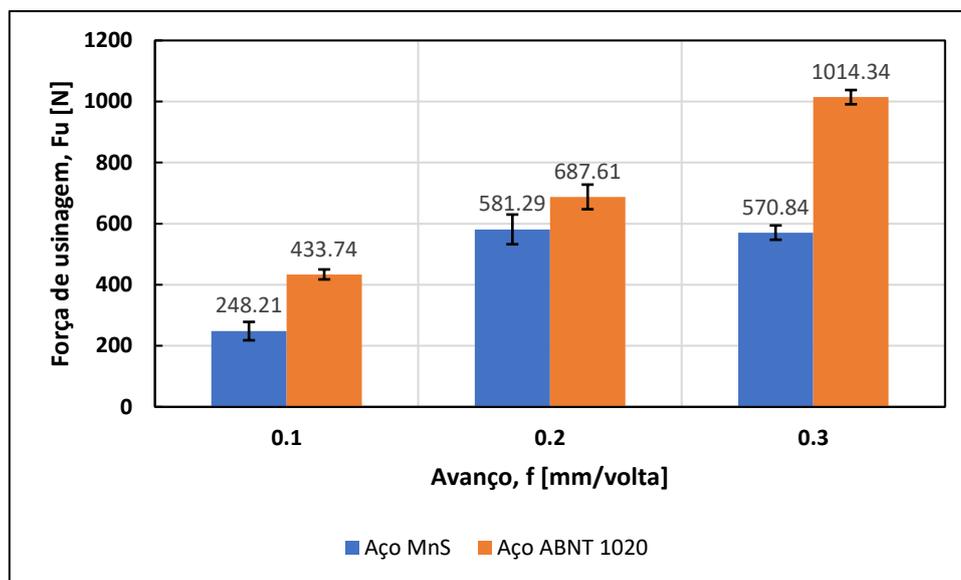


Figura 7. Valores médios e desvio padrão de força de usinagem para os aços com adição de MnS e ABNT 1020

4. CONCLUSÕES

O aço de livre corte de alta resistência avaliado possui uma microestrutura perlítica com inclusões de sulfeto de manganês (MnS). A dureza Vickers média obtida neste material foi 322,8 HV30. O aço ABNT 1020 utilizado como referência para comparações apresenta matriz ferrítica com presença de perlita e apresentou valor médio de dureza Vickers de 180,7 HV30. Em média, a dureza do aço de livre corte foi 78,6% superior ao material de referência.

Embora, o aço de livre corte avaliado fosse mais duro, os resultados do índice de usinabilidade, força de usinagem (F_u), surpreenderam em todo o intervalo experimental, de modo que em média a F_u foi 34,4% menor para o aço com adição de MnS, considerando a operação de torneamento.

Conclui-se que, embora fatores metalúrgicos, como adição de elementos de liga e tratamento térmico, tornem o aço de livre corte avaliado um material de elevada resistência, a adição de elementos de livre corte, tais como MnS, permitiu um torneamento com menor força, possibilitando menor consumo energético e, possivelmente, menor desgaste da ferramenta de corte.

5. AGRADECIMENTOS

À FAPES (TO 144/2020) e ao polo EMBRAPII-IFES.

6. REFERÊNCIAS

American Society For Testing And Materials, 2017. ASTM E92-17: Standard test methods for Vickers hardness and Knoop hardness of metallic materials. West Conshohocken: ASTM International.

Arfeld, E.D.; Hanum, A.L., 1977. "Aços de corte fácil de baixo carbono". *Metalurgia*. ABM, v. 33, n. 241, p.773-776.

- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR NM 87:2000: Aço carbono e ligados para construção mecânica – Designação e composição química. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- Desaigues, J.E.; Lescalier, C.; Arzur, A.B.; Dudzinski, D.; Bomont, O., 2016. “Experimental study of Built-Up Layer formation during machining of high strength free-cutting steel”. *Journal of Materials Processing Technology*, 236, p. 204-215.
- Diniz, A. D.; Marcondes, F. C.; Coppini, N. L., 2014. *Tecnologia da Usinagem dos Materiais*. Artliber, São Paulo.
- Ferraresi, D., 2018. *Fundamentos da Usinagem dos Metais*. Edgard Blucher, São Paulo, 1ª edição.
- Li, Z.; Wu, D., 2010. “Effect of free-cutting additives on machining characteristics of austenitic stainless steels”. *Journal of Materials Science Technology*, 26, p. 839-844.
- Machado, Á.R.; Abrão, A.M.; Coelho, R.T.; da Silva, M.B., 2015. *Teoria da usinagem dos materiais*. Ed. Edgard Blucher, São Paulo, Brazil, 408 p.
- Ramanujachar, K; Subramanian, S.V., 1996. “Micromechanisms of tool wear in machining free cutting steels”. *Wear*, Vol. 197, pp. 45–55.
- Shaw, M.C., 2005. *Metal cutting principles*. Oxford University Press, New York, 2nd edition.
- Tanaka, R.; Yamane, Y.; Sekiya, K.; Narutaki, N.; Shiraga, T., 2007. “Machinability of BN free-machinig steel in turning”. *International Journal of Machine tools & Manufacture*, Vol. 47, pp. 1971–1977.
- Trent, E.M.; Wright, P.K., 2000. *Metal cutting*. Butterworth-Heinemann, Boston, 4th edition.
- Varghese, L.; S. Aravind, S.; Shunmugesh, K., 2017. “Multi-objective optimization of machining parameters during dry turning of 11SMn30 free cutting steel using grey relational analysis”. *Materials Today: Proceedings*, Vol. 4, pp. 4196–4203.
- Xie, J.; Fan, T.; Zeng, Z.; Sun, H.; Fu, J., 2020. “Bi-sulfide existence in 0Cr18Ni9 steel: correlation with machinability and mechanical properties”. *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 9, pp. 9142–9152.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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