

Avaliação da usinabilidade de aço de livre corte com adição de chumbo e/ou bismuto

João Paulo Luiz Grisotto Alves ¹, João Batista Ribeiro Martins ², Mariane Gonçalves de Miranda Salustre ³, Marcelo Bertoletto Carneiro ⁴, Patrícia Alves Barbosa ⁵

¹Laboratório de Tecnologia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo, Brasil. Email: joao.l.alves@edu.ufes.br

²ArcelorMittal, Global R&D Brazil / Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo, Coordenação de Metalurgia, Brasil. Email: jbmartins2008@gmail.com

³ArcelorMittal, Global R&D Brazil, Brasil. Email: mariane.salustre@arcelormittal.com.br

⁴Laboratório de Tecnologia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo, Brasil. Email: marcelo.b.carneiro@ufes.br

⁵Laboratório de Tecnologia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo, Brasil. Email: patricia.a.barbosa@ufes.br

Resumo

O trabalho consiste em avaliar a usinabilidade de dois aços de livre corte ao sulfeto de manganês: (i) com adição de chumbo e bismuto (MnS+PbBi) e (ii) com adição de bismuto (MnS+Bi). Os materiais foram caracterizados quanto à microestrutura e dureza. Ensaio de torneamento foram executados variando o avanço em: 0,1; 0,2 e 0,3 mm/volta. Os índices de usinabilidade avaliados foram a força de usinagem (FU) e a rugosidade (Ra). Os materiais não apresentaram diferença significativa na resposta de FU a partir de 0,2 mm/volta. A adição somente de Bi aumentou a resposta de FU em 106% em comparação ao aço MnS+PbBi para 0,1 mm/volta. Ra foi influenciado pelo avanço aumentando a resposta proporcionalmente. O Aço MnS+Bi pode ser promissor em operações de desbaste, uma vez que não foi evidenciada diferença significativa entre os materiais na resposta Ra e em FU para avanços a partir de 0,2 mm/volta.

Palavras-chave: aço de livre corte; chumbo; bismuto; usinabilidade; força de usinagem; Ra.

Abstract

This work aims to evaluate the machinability of two manganese sulfide free-cutting steels: (i) with lead and bismuth addition (MnS+PbBi), and (ii) with bismuth addition (MnS+Bi). These materials were characterized regarding microstructure and hardness. Turning tests were carried out varying feed rate in 0.1; 0.2; and 0.3 mm/rev. Cutting force and roughness (Ra) were the machinability indexes assessed. No significant difference was evidenced between materials on FU response from 0.2 mm/rev. Adding Bi alone increased the FU response by 106% compared to MnS+PbBi steel to 0.1 mm/rev. Ra was influenced by feed rate increasing the response proportionally. MnS+Bi cutting free steel may be promising in rough turning, since no significant difference was evidenced between materials on Ra response and FU response from 0.2 mm/rev.

Keywords: free cutting steel; lead; bismuth; machinability; machining force; Ra.

1. Introdução

Os aços de livre corte são considerados uma classe de aços especiais definida pela adição de elementos de liga que, isoladamente ou composto com o enxofre (S) e o manganês (Mn) formam inclusões que interrompem a matriz e também possuem um efeito lubrificante, o que faz melhorar a usinabilidade do material

influenciando a vida da ferramenta, o acabamento da superfície da peça usinada, a força de usinagem, bem como a formação do cavaco [1]. Na indústria, a aplicação da classe de aços de livre corte visa aumentar a produtividade concomitantemente com a redução de custos, quando comparada com aços de estrutura similar [2].

O chumbo foi considerado um dos aditivos mais importantes nos aços de livre corte do Século XX, atuando como lubrificante sólido na interface cavaco-ferramenta e como mecanismo de fragilização do cavaco [2-4]. Porém, a adição de chumbo vem sendo restringida em diversos países devido à sua toxicidade ao meio ambiente e ao ser humano [3,4].

Alternativamente, estudos vem sendo conduzidos para o desenvolvimento de aços de livre corte “amigáveis”, visando a substituição do chumbo por elementos de liga não tóxicos, considerando os níveis aceitáveis no efeito ambiental e custos de produção [1,5].

Takashi e Toshiyuki [6] investigaram duas propostas de aços de livre corte sem adição de chumbo: um aço com precipitação de grafita e outro com alto teor de Cr. A alteração da cementita dura em grafita deixa a estrutura do aço mais macia, além disso, a grafita atua como lubrificante sólido na interface cavaco-ferramenta melhorando substancialmente a usinabilidade. Além dessa vantagem, o aço apresentou excelente forjabilidade a frio, satisfazendo amplamente os requisitos de propriedade do aço para uso estrutural. A adição de cromo e o aumento do teor de enxofre cristaliza grandes inclusões de sulfeto, resultando em em usinabilidade igual ou superior quando comparado com o aço SAE 12L14, nos critérios de vida da ferramenta e rugosidade.

Di e Zhuang [7] investigaram um novo aço inoxidável austenítico de alta usinabilidade livre de Pb com adição de bismuto. Eles mostraram a importância da adição de Bi na melhoria da usinabilidade do aço inoxidável austenítico promovendo maior vida de ferramenta e menores forças de corte.

Xu et al. [8] investigaram a viabilidade de produção de aço de livre corte microligado com estanho (Sn) em substituição à adição de chumbo. Eles concluíram que a rugosidade da superfície da peça usinada é reduzida e os cavacos são mais frágeis com o aumento do teor de Sn melhorando assim a usinabilidade do aço.

Nesse contexto, o objetivo do trabalho consiste em avaliar a usinabilidade em operação de torneamento de dois aços de livre corte de matriz ferrítica contendo sulfeto de manganês (MnS): (i) com adição de chumbo e bismuto (Pb+Bi), e (ii) com adição somente de bismuto (Bi).

2. Materiais e Métodos

Os materiais investigados no presente trabalho consistem de duas ligas de aços de livre corte ao sulfeto de manganês (MnS) de matriz ferrítica, codificados como: (i) MnS+PbBi (aço de livre corte ao sulfeto de manganês, com adições de chumbo e bismuto); e (ii) MnS+Bi (aço de livre corte ao MnS com adições de

bismuto), fornecidas na forma de barras laminadas de seção circular com diâmetro nominal de 25,4 mm.

A Tabela 1 apresenta a composição química conforme indicado pelo fornecedor.

Tabela 1. % de elementos em massa.

Material Elemento	MnS+PbBi	MnS+Bi
Mn	0,6 – 1,5	0,6 – 1,5
S	0,5 max.	0,5 max.
Si	0,1 – 0,4	0,1 – 0,4
P	0,06 max.	0,06 max.
Mg+Pb+Bi	0,3 max.	0,7 max.
Cr+Ni+Cu+Mo	0,3 max.	0,03 max.
C	0,4 – 0,7	0,4 – 0,7

Fonte: elaboração própria.

Os materiais foram caracterizados quanto à microestrutura, para destacar os elementos de livre corte, e dureza.

A caracterização da microestrutura e análise dos elementos de livre corte foram realizadas em microscópio óptico invertido Eclipse MA200 (NIKON), microscópio eletrônico de varredura (MEV) Quanta 650 FEG (FEI), com detector de espectro de energia dispersiva (EDS) Quantax (Bruker).

A dureza das amostras foi avaliada por meio de ensaios de dureza por indentação Vickers em um durômetro 200HBRV-187.5S (Lleida), seguindo a norma ASTM E92-23 [9]. Foram realizadas 10 indentações em cada amostra, tanto nas seções transversais quanto nas longitudinais, aplicando-se uma carga de 30 kgf por 10 s.

Os ensaios de torneamento a seco foram conduzidos em torno CNC Centur 35D (ROMI). Foram utilizadas ferramentas de metal duro, sem revestimento, TPUN 160304, classe ISO P30 (BRASSINTER) montadas em um suporte CTGPR 2525 M16 (SANDVIK), que confere uma geometria de corte semi-ortogonal, com ângulo de inclinação (λ_s) de 0°, ângulo de saída positivo ângulo (γ_o) de 6° e ângulo de posição (χ_r) de 91°. A velocidade de corte e a profundidade de corte foram mantidas constantes em 150 m/min e 1 mm, respectivamente; e o avanço foi variado em 0,1; 0,2 e 0,3 mm/volta. A fixação da velocidade de corte foi devido ao pequeno diâmetro das barras (25,4 mm) e limitação de rotação máxima da máquina-ferramenta de 2000 rpm com uso de placa de 250 mm de diâmetro.

Os índices de usinabilidade avaliados foram a força de usinagem e a rugosidade da superfície da peça usinada.

As componentes da força de usinagem foram monitoradas através de um sistema de medição de força

de usinagem (KISTLER), composto por dinamômetro piezoelétrico modelo 9129 AA, amplificador de sinais modelo 5080A1030001, sistema de aquisição modelo 5697A1 com software de análise DynoWare, como apresentado na Figura 1. O sistema captura o sinal das três componentes ortogonais da força atuante durante a usinagem: F_x , F_y e F_z , para uma faixa de medição de ± 10 kN; sensibilidade de ≈ -8 pC/N para as componentes x e z , e $\approx -4,1$ pC/N para a componente y ; e incerteza de medição do sistema de 2%. Foi utilizada uma taxa de aquisição de 1 kHz. A força de usinagem é determinada pela equação (1).

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



Figura 1. Sistema de medição de força Kistler para o monitoramento das componentes ortogonais da força de usinagem. Fonte: elaboração própria.

O parâmetro de rugosidade média (R_a) foi medido por meio de um rugosímetro portátil de contato SJ-210 (MITUTOYO). Os comprimentos de amostragem (cut-off) utilizados basearam-se nas recomendações das normas ABNT NBR ISO 4287:2002 [10] e ABNT NBR ISO 4288:2008 [11].

As medições de rugosidade foram realizadas para cada percurso de avanço usinado (L_f) de 15 mm, correspondente a cada teste e réplicas, em quatro planos de medição espaçados a 90° , conforme esquematizado na Figura 2.

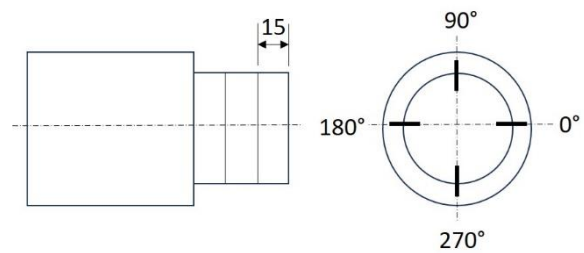


Figura 2. Configuração esquemática do posicionamento para medição de rugosidade na barra usinada, à esquerda: comprimento do percurso de avanço (L_f) e à direita: identificação dos planos de medição. Fonte: elaboração própria.

3. Resultados

3.1. Caracterização

As Figuras 3 e 4 apresentam imagens representativas da microestrutura dos aços de livre corte MnS+PbBi e MnS+Bi, atacados com Nital 2%, respectivamente. As imagens revelam que ambos os materiais são constituídos por uma matriz de estrutura ferrítica com ilhas perlíticas e presença de inclusões MnS de pequenas dimensões, quando comparado com as outras fases, dispersas na matriz. Na seção longitudinal, observa-se que a fase perlítica e as inclusões estão deformadas na direção horizontal, indicando o sentido de laminação das barras. A presença das adições de PbBi e Bi estão evidenciadas nas imagens de MEV, destacadas como um envólucro branco em algumas inclusões de MnS.

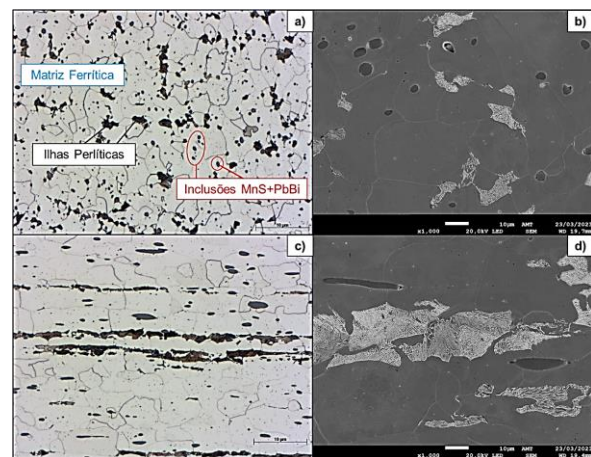


Figura 3. Imagens de microestrutura do aço de livre corte MnS+PbBi atacado com Nital 2%. a) MO da seção transversal (x100). b) MEV da seção transversal (x1000). c) MO da seção longitudinal (x1000). d) MEV da seção longitudinal (x1000). Fonte: elaboração própria.

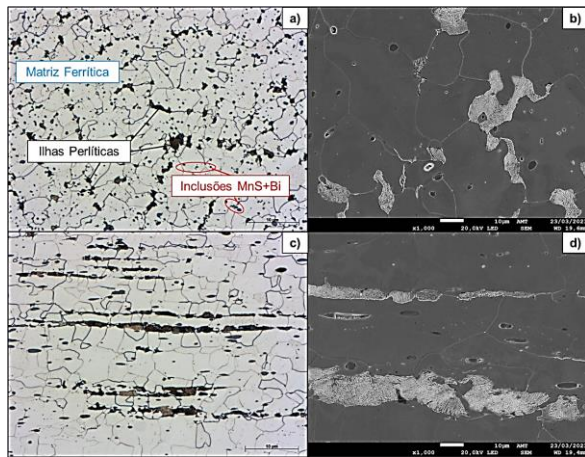


Figura 4. Imagens de microestrutura do aço de livre corte MnS+Bi atacado com Nital 2%. a) MO da seção transversal (x100). b) MEV da seção transversal (x1000). c) MO da seção longitudinal (x100). d) MEV da seção longitudinal (x1000). Fonte: elaboração própria.

As Figuras 5 e 6 apresentam a análise de EDS das inclusões dos aditivos de livre corte dos aços investigados. Pode-se observar, que tanto o mapeamento químico quanto os espectros da análise química evidenciaram os elementos que compõe o sulfeto de manganês nos dois materiais, e que esta inclusão está envolta por diferentes elementos de acordo com cada material em estudo. No aço MnS+PbBi foi detectada a presença de chumbo e bismuto (Figuras 5.b e 5.d) e no aço MnS+Bi a presença de bismuto (Figuras 6.b e 6.d). Segundo Xi et al. [12], o Bi pode se apresentar de forma isolada disperso na matriz, fazendo ponte de ligação entre inclusões de sulfeto de manganês, semiencapsulando o MnS, e/ou encapsulando completamente o MnS. Comportamento similar também foi observado para o PbBi (Figuras 5a e 5b).

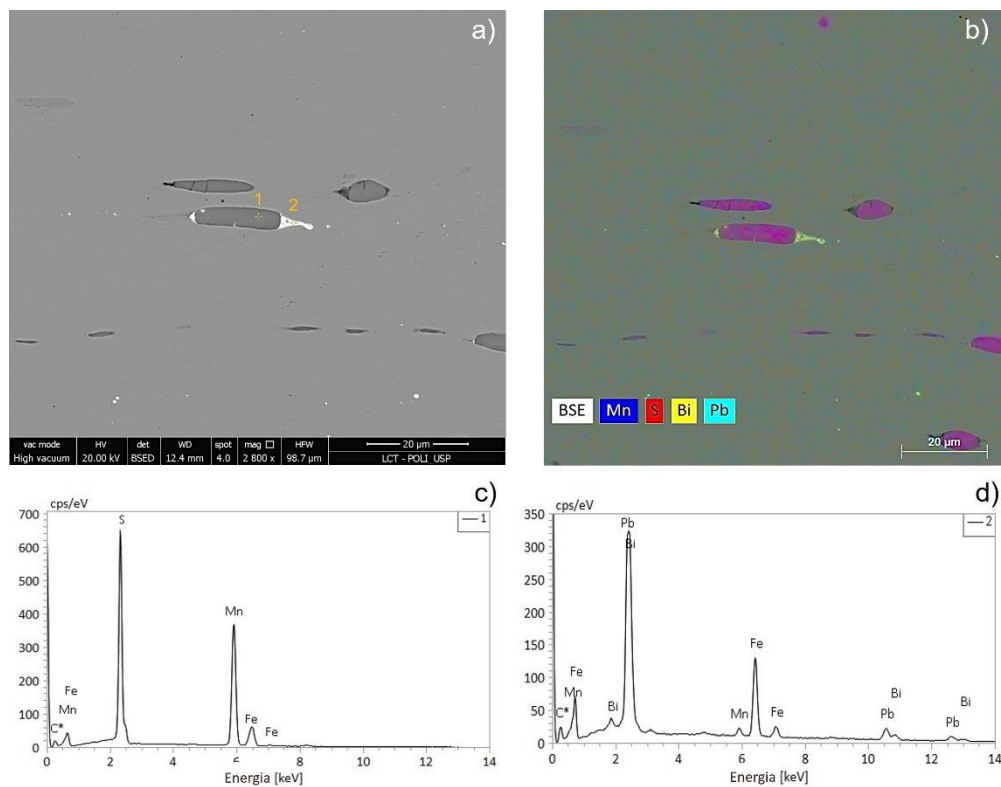


Figura 5. Imagens de MEV/EDS da inclusão do aditivo de livre corte do aço MnS+PbBi. a) MEV da seção longitudinal destacando os pontos de análise de EDS. b) Mapeamento químico por EDS. c) Espectro da análise química no interior da inclusão de MnS (Ponto 1). d) Espectro da análise química no interior da fase clara (PbBi) que envolve a inclusão de MnS (Ponto 2). Fonte: elaboração própria.

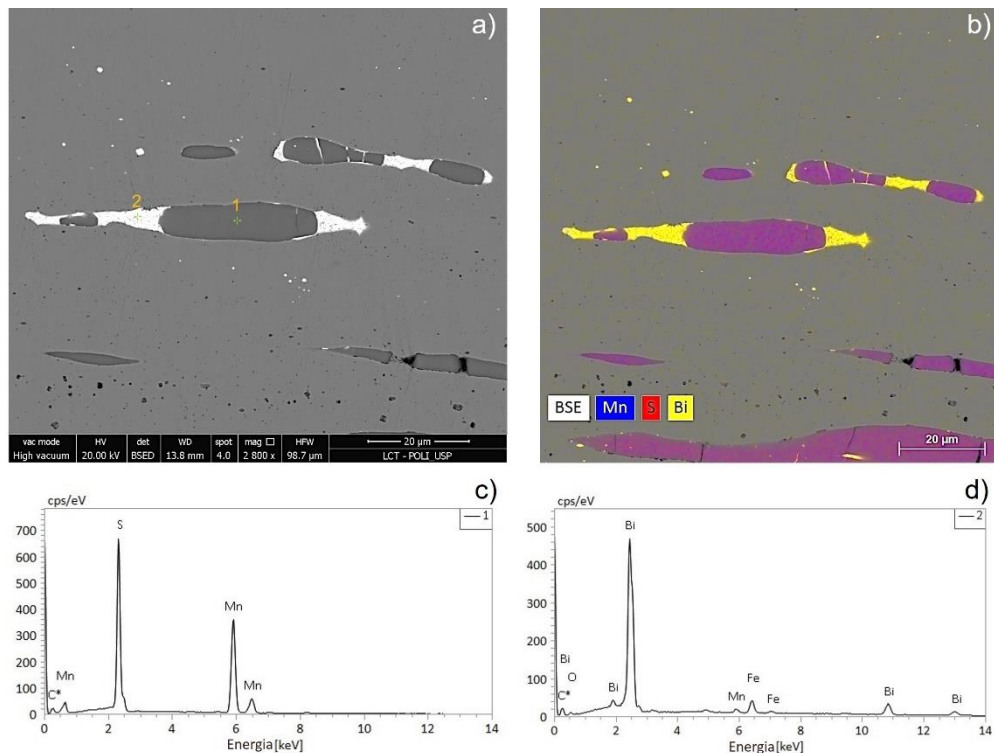


Figura 6. Imagens de MEV/EDS da inclusão do aditivo de livre corte do aço MnS+Bi. a) MEV da seção longitudinal destacando os pontos de análise de EDS. b) Mapeamento químico por EDS. c) Espectro da análise química no interior da inclusão de MnS (Ponto 1). d) Espectro da análise química no interior da fase clara (Bi) que envolve a inclusão de MnS (Ponto 2). Fonte: elaboração própria.

A Tabela 2 apresenta os resultados de Dureza Vickers (HV30) para as seções transversais e longitudinais dos materiais analisados.

Tabela 2. Dureza Vickers HV30 dos aços de livre corte com adição de chumbo e/ou bismuto.

MnS+PbBi		MnS+Bi	
Seção Transversal	Seção Longitudinal	Seção Transversal	Seção Longitudinal
188,3±5,3	185,0±4,9	180,5±6,4	180,6±4,1

Fonte: elaboração própria.

A Tabela 3 apresenta a análise de variância (ANOVA), com réplicas, do número de dureza Vickers, para um nível de significância (α) de 5%, considerando os diferentes materiais e seções das amostras. SS significa somatório dos quadrados, GL grau de liberdade, MS quadrado médio ou variância, F valor calculado para distribuição Fisher, e p o nível de significância calculado. Os resultados mostraram que somente a variável principal material influenciou significativamente os resultados de dureza, uma vez que o nível de significância calculado (p) é menor do que o critério (α) utilizado no teste de hipótese ($p < 0,05$).

Tabela 3. ANOVA para o número de dureza Vickers (HV30).

Efeito	SS	GL	MS	F	p
Média	1348248	1	1348248	44167,09	0,000000
Material	369	1	369	12,09	0,001342
Seção	25	1	25	0,83	0,367366
Material x Seção	31	1	31	1,02	0,319139
Erro	1099	36	31		

Fonte: elaboração própria.

A Figura 7 apresenta o gráfico de efeitos evidenciando a diferença significativa entre os diferentes aços de livre corte na resposta de dureza. Observa-se que a dureza Vickers do aço MnS+PbBi é, em média, 3,3% maior que a do aço MnS+Bi.

A ligeira diferença na resposta de dureza entre os aços MnS+PbBi e MnS+Bi evidenciada na Figura 7 pode ter sido influenciada pela diferente composição química e tamanho das inclusões.

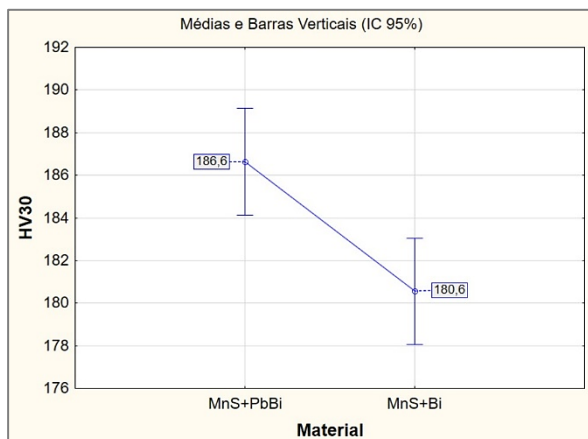


Figura 7. Gráfico de efeitos do material na resposta de dureza Vickers (HV30). Fonte: elaboração própria.

3.2. Usinabilidade

A Figura 8 mostra os sinais representativos de força de usinagem (FU) ao longo do tempo para os diferentes aços de livre corte, MnS+PbBi e MnS+Bi, nas três condições de avanço avaliadas. Pode-se observar que quanto maior o avanço, menor é o tempo de corte.

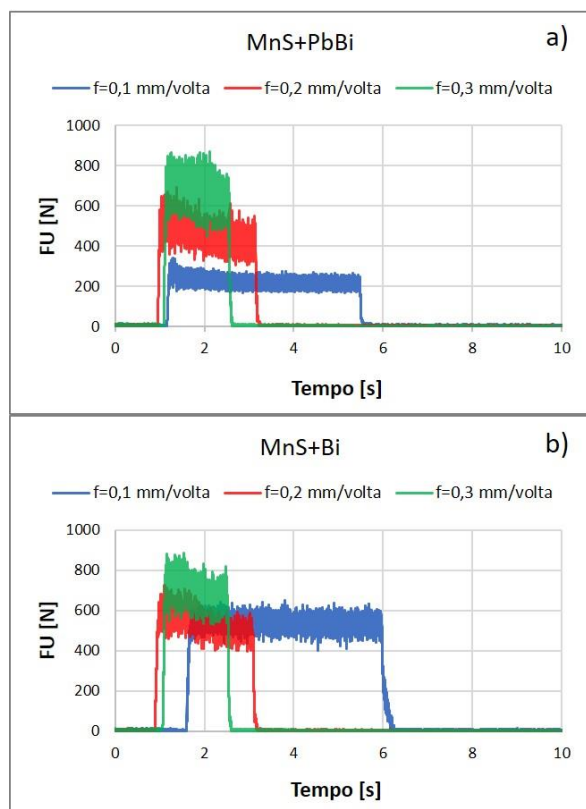


Figura 8. Sinais representativos de força de usinagem (FU) ao longo do tempo para as três condições de avanço avaliadas para os aços a) MnS+PbBi e b) MnS+Bi. Fonte: elaboração própria.

Na Tabela 4 tem-se a análise de variância (ANOVA),

dos dados de força de usinagem para um nível de significância (α) de 5%, considerando os diferentes materiais e avanços avaliados. Neste caso, a análise estatística indica que as variáveis principais material e avanço influenciaram significativamente a resposta FU ($p < \alpha$). Todavia, existe uma forte interação entre estas variáveis ($p < 0,05$).

Tabela 4. ANOVA para a força de usinagem (FU).

Efeito	SS	GL	MS	F	p
Média	4834078	1	4834078	5548,932	0,000000
Material	53005	1	53005	60,843	0,000005
f	268428	2	134214	154,061	0,000000
Material x f	54373	2	27186	31,207	0,000018
Erro	10454	12	871		

Fonte: elaboração própria.

A Figura 9 apresenta o gráfico de efeitos da resposta FU para a interação entre os materiais (aços MnS+PbBi e MnS+Bi) e avanços (0,1; 0,2 e 0,3 mm/volta).

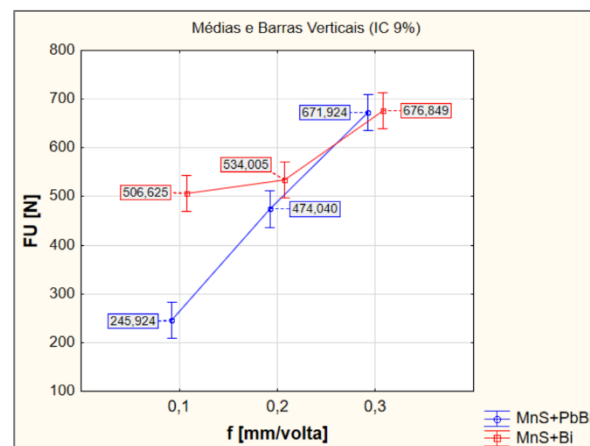


Figura 9. Gráfico de efeitos da interação entre material e avanço na resposta de força de usinagem (FU). Fonte: elaboração própria.

Observa-se na Figura 9 que existe uma diferença de comportamento na resposta média da força de usinagem para os materiais nas diferentes condições de avanço. A resposta de FU para o aço de livre corte MnS+PbBi apresentou um aumento médio aproximadamente linear com o aumento do avanço. Os resultados da análise estatística para o aço de livre corte MnS+Bi, mostrou que o aumento do avanço de 0,1 mm/volta para 0,2 mm/volta não influenciou significativamente na resposta de FU, enquanto que para o avanço de 0,3 mm/volta foi evidenciada uma diferença significativa na resposta, aumentando FU, em média, 26,75% em relação a f igual a 0,2 mm/volta. Adicionalmente, pode ser observado que para o avanço de 0,1 mm/volta os materiais apresentam respostas estatisticamente diferentes. Nesta condição de avanço,

o aço MnS+Bi apresentou força de usinagem, em média, 106% maior que o aço MnS+PbBi. E com o aumento do avanço essa diferença vai se reduzindo, de forma que, a partir do avanço de 0,2 mm/volta os dois aços de livre corte não apresentam diferença estatisticamente significativa na resposta de FU.

A Figura 10 mostra os resultados de rugosidade média (Ra) para os diferentes aços de livre corte nas três condições de avanço avaliadas. Percebe-se que os resultados de rugosidade média apresentam comportamento similar entre os materiais para os avanços investigados, aumentando a resposta com o aumento de f.

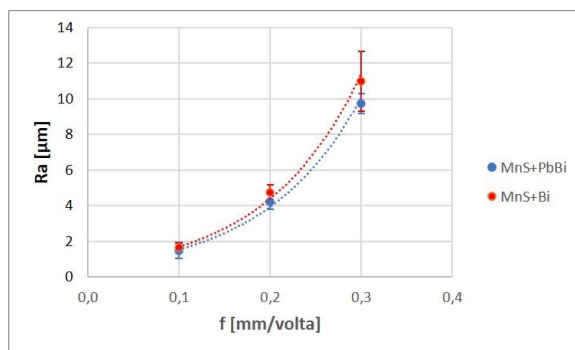


Figura 10. Resultados de Ra em função do avanço para os aços MnS+PbBi e MnS+Bi. Fonte: elaboração própria.

A Tabela 5 apresenta os resultados da análise de variância (ANOVA) de rugosidade média, para um nível de significância (α) de 5%, considerando os diferentes materiais e avanços avaliados. Neste caso, somente a variável principal avanço mostrou influência significativa na resposta Ra ($p < 0,05$), corroborando com os resultados mostrados na Figura 10.

Tabela 5. ANOVA para a rugosidade média (Ra).

Efeito	SS	GL	MS	F	p
Média	537,1768	1	537,1768	860,4552	0,000000
Material	1,7534	1	1,7534	2,8087	0,119593
f	239,8150	2	119,9075	192,0690	0,000000
Material x f	0,9481	2	0,4741	0,7494	0,489190
Erro	7,4915	12	0,6243		

Fonte: elaboração própria.

A Figura 11 apresenta o gráfico de efeitos evidenciando o aumento de Ra com o avanço, aumentando, em média, 184,7% e 131,3%, quando se elevou f de 0,1 mm/volta para 0,2 mm/volta e de 0,2 mm/volta para 0,3 mm/volta, respectivamente. Os resultados da influência do avanço na rugosidade média seguem comportamento similar ao da rugosidade média teórica proposta por Boothroyd e

Knight [13] que apresenta Ra como função diretamente proporcional à f^2 .

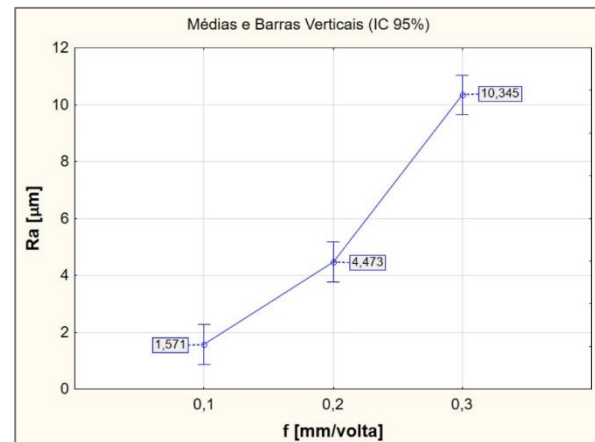


Figura 11. Gráfico de efeitos do avanço na resposta de Ra. Fonte: elaboração própria.

4. Conclusões

A partir da caracterização dos aços de livre corte ao sulfeto de manganês contendo chumbo e/ou bismuto e da avaliação da usinabilidade destes materiais para diferentes avanços, podem-se destacar as seguintes conclusões:

- Os aços de livre de corte MnS+PbBi e MnS+Pb possuem matriz ferrítica com ilhas perlíticas e elementos de livre corte na forma de inclusões insolúveis a matriz;
- Os elementos de livre corte são formados por sulfetos de manganês (MnS) em formato elipsoidal, envoltos por PbBi ou Bi;
- O aço de livre corte MnS+PbBi apresenta dureza Vickers, em média, 3,3% maior que o aço MnS+Bi;
- Para as condições de avanço avaliadas, a força de usinagem aumenta proporcionalmente com o avanço durante o torneamento do aço MnS+PbBi;
- Não existe diferença significativa na força de usinagem durante o torneamento do aço MnS+Bi nos avanços de 0,1 mm/volta e 0,2 mm/volta;
- A força de usinagem aumenta, em média, 26,75% com o aumento do avanço de 0,2 mm/volta para 0,3 mm/volta, durante o torneamento do aço MnS+Bi;
- Durante o torneamento com avanço de 0,1 mm/volta, o aço MnS+Bi apresenta força de usinagem, em média, 106% maior que o aço MnS+PbBi;

- A adição de PbBi ou somente de Bi ao aço de livre corte ao sulfeto de manganês não altera a resposta de acabamento superficial;

- A rugosidade média tem uma relação diretamente proporcional à F^2 ;

- No presente estudo o aço de livre corte MnS+Bi mostra-se promissor como substituto de aços de livre corte ao sulfeto de manganês com adições de chumbo, para operações de desbaste em torneamento, considerando que a rugosidade média não foi influenciada pelas diferentes adições de PbBi ou Bi; e somente em baixos avanços (0,1 mm/volta) a força de usinagem do aço MnS+Bi foi consideravelmente maior que a do aço contendo PbBi.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem a FAPES (144/2020), CAPES, Embrapii-IFES, ArcelorMittal Brasil.

6. Referências

- [1] J.-E. Desaignes, C. Lescalier, A.B. -Arzur, D. Dudzinski, O. Bomont. "Experimental study of Built-Up Layer formation during machining of high strength free-cutting steel". *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 236, pp. 204-215, 2016. [PDF]. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmatp.rotec.2016.05.016>
- [2] D. Živković, N. Štrbac, S. Ekinović, E. Begović. "Lead-free free-cutting steels as modern environmentally friendly materials". *Ecologica*, vol. 18, pp. 451-456, 2011. [PDF]. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/281812810>
- [3] C.I. Garcia, M.J. Hua, M.K. Miller, A.J. Deardo. "Application of Grain Boundary Engineering in Lead-free Green Steel". *ISIJ International*, vol. 43, pp. 2023-2027, 2003. [PDF]. Disponível em: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.43.2023>
- [4] V. Kurka, Z. Kuboň, L. Kander, P. Jonšta, O. Kotásek. "The Effect of Bismuth on Technological and Material Characteristics of Low-Alloyed Automotive Steels with a Good Machinability". *Metals*, vol. 12, pp. 1-14, 2022. [PDF]. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/met12020301>
- [5] M. Hashimura, K. Miyanishi, A. Mizuno. "Development of Lead-free Free-cutting Steel and Cutting Technology". *NIPPON STEEL & SUMITOMO METAL technical report*, vol. 116, pp. 32-37, 2017. [PDF]. Disponível em: <https://www.nipponsteel.com/en/tech/report/nssmc/pdf/116-07.pdf>
- [6] I. Takashi, M. Toshiyuki. "Bar and Wire Steels for Gears and Valves of Automobiles - Eco-friendly Free Cutting Steel without Lead Addition". *JFE technical report*, vol. 4, pp. 74-80, 2004. [PDF]. Disponível em: <https://www.jfe-steel.co.jp/en/research/report/004/pdf/004-13.pdf>
- [7] W. Di, L. Zhuang. "A New Ph-Free Machinable Austenitic Stainless Steel". *Journal of Iron and Steel Research International*, vol. 17, pp. 59-63, 2010. [PDF]. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(10\)60046-5](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(10)60046-5)
- [8] X. Xu, T.-F. Chung, S. Hu, Q. Zhu, J. Fu, J.-R. Yang, Q. Tian. "Effect of tin microalloying on the microstructure of low-carbon free-machining steels". *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 20, pp. 1172-1185, 2022. [PDF]. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.07.153>
- [9] American Society for Testing and Materials. ASTM International E92-23: Standard Test Methods for Vickers Hardness and Knoop Hardness of Metallic Materials¹. West Conshohocken: ASTM (2023). Disponível em: <https://www.astm.org/e0092-23.html>
- [10] Associação Brasileira De Normas Técnicas. ABNT NBR ISO 4287: Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade. Rio de Janeiro: ABNT (2002). Disponível em: <https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/22323/abnt-nbriso4287>
- [11] Associação Brasileira De Normas Técnicas. ABNT NBR ISO 4288: Especificações geométricas do produto (GPS) — Rugosidade: Método do perfil - Regras e procedimentos para avaliação de rugosidade. Rio de Janeiro: ABNT (2008). Disponível em: <https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/27793/nbriso4288>
- [12] J. Xie, T. Fan, Z. Zeng, H. Sun, J. Fu. "Bi-sulfide existence in 0Cr18Ni9 steel: correlation with machinability and mechanical properties". *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 9, pp. 9142-9152, 2020. [PDF]. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.06.043>
- [13] G. Boothroyd, W.A. KnightFu. "Fundamentals of Machining and Machine Tools". Marcel Dekker, Inc, New York, 1989.