ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE CORTE E DAS CONDIÇÕES LUBRIRREFRIGERANTES NO FRESAMENTO DE TOPO DO AÇO INOXIDÁVEL SUPER AUSTENÍTICO ULTRA® 254 SMO

Émerson dos Santos Passari, Universidade Federal do Rio Grande do Sul**,** emerson.passari@gmail.com
Diego da Silva Meyer Lopes, Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Fernando Pasquali, Universidade Federal do Rio Grande do Sul
André João de Souza, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Resumo. *Os aços inoxidáveis possuem elevada importância na indústria mecânica, com diversas aplicações em instrumentos cirúrgicos, utensílios domésticos, componentes automotivos etc., principalmente por sua característica de resistência a oxidação. Um tipo particular é o aço inoxidável super austenítico (SASS), que apresenta alta resistência à corrosão por pites e é usado em setores industriais como alimentício, farmacêutico e químico. No entanto, a usinagem do SASS é um desafio devido à sua alta resistência mecânica, baixa condutividade térmica e tendência ao endurecimento por deformação. Assim, o presente estudo aborda a influência dos parâmetros de corte e das condições lubrirrefrigerantes nas forças de usinagem e nas rugosidades geradas durante o fresamento de topo do aço inoxidável super austenítico Ultra® 254 SMO. Os resultados indicaram que a profundidade de corte é o parâmetro mais sensível sobre os valores de força. O MQL (mínima quantidade de lubrificante) gerou uma menor taxa de desgaste da ferramenta que as usinagens a seco e com fluido em abundância. Os valores de rugosidade foram, em geral, baixos (Ra ≤ 0,6 μm) e não foram significativamente afetados pelo desgaste da ferramenta ou pelos parâmetros de corte, mas sim pelas condições de lubrirrefrigeração.*

Palavras-chave: *aço inoxidável super austenítico, fresamento de topo, condições lubrirrefrigerantes, força de usinagem, rugosidade.*

1. INTRODUÇÃO

Ao longo do tempo, a utilização dos aços inoxidáveis (SS) tem experimentado um aumento contínuo, assumindo uma posição proeminente entre os materiais utilizados na construção mecânica, encontrando uma ampla gama de aplicações desde instrumentos cirúrgicos até componentes automotivos, aeronáuticos e navais, bem como nas indústrias química, farmacêutica e petrolífera (Kaladhar *et al.*, 2012). Essas aplicações variadas são respaldadas por qualidades como ductilidade, resistência mecânica, longevidade do material e resistência à corrosão (Nayak *et al.*, 2014). Adicionalmente, a reciclagem dos SS pode ser realizada sem degradação, consolidando seu status como uma escolha ambientalmente benéfica (Varghese *et al.*, 2018). Também se destacam as ligas super auestenícticas (SASS), denominação utilizada para ASS contendo elevados teores de Cr, Ni, Mo e N, resultando em um teor de Fe igual ou menor a 50%, como os aços 654 SMO, 904L e 254 SMO (Plaut *et al*., 2007). Segundo Fan *et al*. (2020), pesquisas sobre SASS e suas aplicações estão em crescimento devido a sua elevada resistência à corrosão, muito atrativa às indústrias de energia, química e naval.

A usinagem limpa de ASS e SASS têm recebido crescente atenção devido a sua ampla aplicação e importância deste material na indústria, bem como a necessidade de reduzir os impactos ambientais e promover a saúde e segurança dos trabalhadores. Pesquisas apontam que técnicas alternativas de lubrirrefrigeração (como a mínima quantidade de lubrirrefrigeração – MQL) podem apresentar resultados superiores em relação aos fluidos de corte tradicionais quanto a esforços de corte, vida de ferramenta, integridade superficial e produtividade (Debnath *et al.*, 2014).

Durante o corte, forma-se uma camada encruada de alta resistência que se opõe ao avanço da ferramenta, aumentando a força e a potência de usinagem (a máquina-ferramenta deve ser suficientemente rígida para suportar os esforços de corte). Simultaneamente, a formação de cavacos longos e serrilhados (alta ductilidade do material) e o atrito elevado na interface ferramenta/peça causam flutuação nas forças e aquecimento na região de corte. Por terem uma baixa condutividade térmica, os SS não dissipam efetivamente o calor gerado. O aquecimento excessivo acaba acelerando as falhas (desgastes e avarias) na ferramenta, comprometendo a sua vida e consequentemente a qualidade da superfície usinada da peça, havendo a necessidade de se reduzir a velocidade de corte. Além disso, a adesão severa e a tendência à formação da aresta postiça de corte são outros fatores que contribuem para agravar os problemas de usinagem inerentes a esse tipo de material (Camargo, 2008).

Com a constante evolução na utilização dos aços inoxidáveis e o desenvolvimento de novas ligas, com grande resistência à corrosão e elevadas propriedades mecânicas, a usinagem destes materiais deve ser aprimorada para atender tanto as necessidades de produtividade quanto os requisitos ambientais cada vez mais presentes nos processos produtivos (Oliveira *et al*., 2007). Pelos aços inoxidáveis super austeníticos serem ainda de aplicações restritas, existem poucos trabalhos na literatura abordando a usinagem desses materiais. Desta forma, objetiva-se neste trabalho investigar a influência da variação dos parâmetros de corte e da utilização de diferentes meios lubrirrefrigerantes nas forças e rugosidades geradas pelo fresamento de topo do SASS Ultra® 254 SMO.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O experimento consistiu no fresamento de topo em corpos de prova de aço inoxidável super austenítico Ultra® 254 SMO com dimensões 70 x 30 x 10 mm. A máquina-ferramenta utilizada foi o centro de usinagem ROMI Discovery 308 com potência máxima de 5,5 kW e rotação máxima de 4000 rpm. Utilizou-se uma fresa de topo Walter Tools Xtra-tec® F4042R.W20.02, com diâmetro de 20 mm e suporte para dois insertos Walter Tools Tiger-tec Silver® ADMT10, classe WSM35S com raio de ponta r_e = 0,8 mm e revestimento PVD TiAlN + Al_2O_3.

Como variáveis de resposta, as componentes da força de usinagem e a rugosidade da superfície usinada (perfis e parâmetros) foram avaliadas para cada passe, bem como verificados os desgastes e avarias na ferramenta para cada conjunto de três passes realizados. A aquisição dos sinais de força nas direções dos eixos coordenados (F_x, F_y, F_z) foi feita através do dinamômetro piezelétrico Kistler 9272. Os sinais analógicos adquiridos foram condicionados através de um amplificador de carga da Kistler 5070A e coletados através de uma placa de aquisição de dados Measurement Computing PCIM-DAS 1602/16, instalada em um microcomputador dedicado. Por fim, os dados foram processados através do software LabVIEW™ 9.0. A taxa de aquisição de sinais utilizada foi de 1,0 kS/s. A rugosidade gerada na superfície por fresamento de topo foi mensurada utilizando o rugosímetro portátil Mitutoyo SJ-201P com resolução de 0,01 μm. Os valores de rugosidade média (R_a) foram medidos com auxílio do software Surftest SL Tools utilizando um comprimento de amostragem de 0,8 mm e um comprimento de medição de 4 mm.A fim de verificar a presença de possíveis desgastes e/ou avarias, imagens do estado de ferramenta, foram capturadas utilizando o microscópio digital USB Dino Lite modelo AM 413 ZT auxiliado pelo software Dino Capture 2.0.

Foram avaliadas três condições lubrirrefirgerantes: a seco, com fluido em abundância e mínima quantidade de lubrificação (MQL). Na condição abundante, utilizou-se o fluido comercial Bondmann BD-Fluid B90, isento de óleo e biodegradável, aplicado em uma diluição em volume de água de 1:20. Na condição MQL, foi utilizado o fluido Bondmann Way 45-V, com nanopartículas de prata, sendo 100% solúvel em água e biodegradável, a uma vazão de 240 ml/h com pressão de 3 bar.

O procedimento experimental baseou-se na realização de 15 passes (correspondente a um comprimento usinado de 450 mm ou um tempo de corte de 2,7 min) para cada condição lubrirrefrigerante, variando um dos parâmetros a cada cinco passes, enquanto os outros dois eram mantidos constantes em nível médio, totalizando 45 passes. A Tabela (1) apresenta os parâmetros de corte utilizados. Percebe-se que os passes 3*, 8* e 13* apresentam a mesma combinação de parâmetros de corte, e foram utilizados como passes de referência com o intuito de verificar, para cada condição de lubrirrefrigeração, se os valores das forças de usinagem medidos sofreram alterações com possíveis falhas na ferramenta de corte. Vale salientar que um par de arestas novas foi utilizado para cada condição de lubrirrefrigeração, substituídas após a realização dos 15 passes do conjunto.

Tabela 1 – Parâmetros de corte selecionados para cada condição lubrirrefrigerante

Passe	1	2	**3***	4	5	6	7	**8***	9	10	11	12	**13***	14	15
v_c	100	100	**100**	100	100	100	100	**100**	100	100	60	80	**100**	120	140
f_z	0,06	0,06	**0,06**	0,06	0,06	0,02	0,04	**0,06**	0,08	0,1	0,06	0,06	**0,06**	0,06	0,06
a_p	0,2	0,4	**0,6**	0,8	1,0	0,6	0,6	**0,6**	0,6	0,6	0,6	0,6	**0,6**	0,6	0,6

Na determinação dos valores de força de usinagem (F_U) a partir da Equação (1), considerou-se a média de 2 mil pontos coletados dentro do intervalo estável de usinagem, isto é, desconsiderando a entrada e a saída da ferramenta da peça. No caso dos valores de rugosidade, considerou-se a média e o desvio padrão de cinco pontos medidos no mesmo intervalo.

$$F_U = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \tag{1}$$

3. RESULTADOS

3.1 Força de Usinagem

A Figura (1) mostra o gráfico das forças de usinagem obtidas para os 15 passes realizados. Observa-se um crescimento linear e acentuado das forças de usinagem (F_U) ao longo dos cinco passes iniciais, para todas as condições de lubrirrefrigeração, indicando uma forte influência da profundidade de corte (a_p) sofre a força total de usinagem. Um crescimento também linear das forças menos acentuado é observado entre os passes 6 e 10, onde há variação do avanço por dente (f_z). Destaca-se o passe 10, no qual foi identificada um grande aumento da força de usinagem nas condições a seco e com fluido em abundância, possivelmente por causa de uma falha da ferramenta ocorrida durante esse passe. Também se observa que os valores de F_U entre os passes 11 e 15 não sofreram aumentos significativos, mantendo-se próximos nos cinco passes onde os valores da velocidade de corte (v_c) são variados.

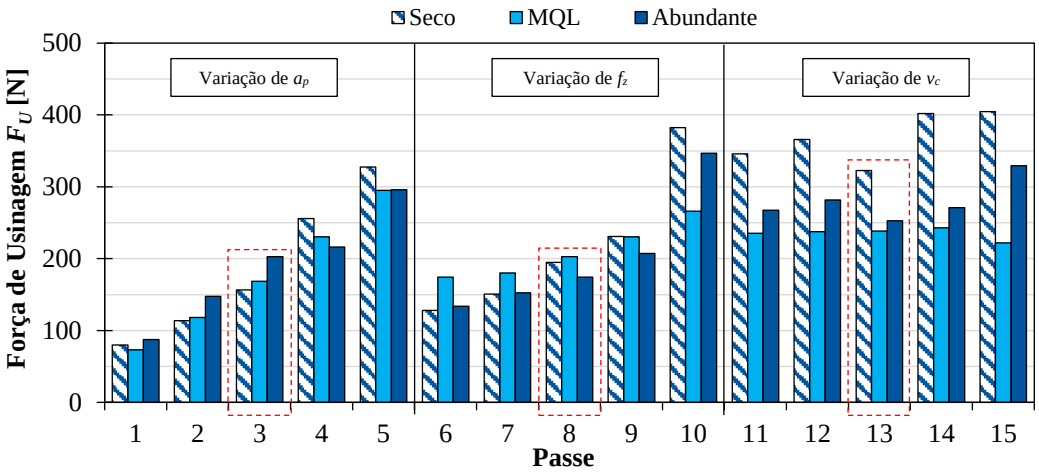


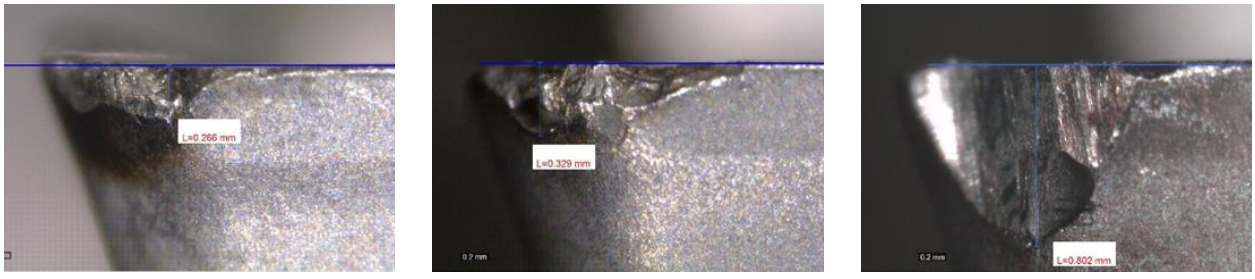
Figura 1 – Gráfico comparativo das forças de usinagem medidas para todos os passes realizados.

Na comparação entre os passes de referência (3*, 8* e 13*), nota-se que o passe 13* apresenta maiores valores de F_U para todas as condições de lubrirrefrigeração. Isso mostra que os efeitos dos desgastes e avarias na ferramenta após o passe 9 exerceram grande influência nos valores de força (Passari *et al.*, 2022).

Com relação ao efeito lubrirrefrigerante sobre as forças de usinagem, até o passe 9, não é possível observar diferenças significativas. A média dos valores de F_U ficou em torno de 183 N para as três condições. Contudo, após o passe 9, o valor médio da força aplicando MQL (240 N) foi 54,1% menor que no corte a seco (370 N) e 21,3% menor que na usinagem com fluido em abundância (292 N). Isso pode indicar que as falhas na ferramenta foram maiores no corte a seco e menores no fresamento com MQL.

3.2 Desgaste da Ferramenta

A Figura (2) mostra os estados das ferramentas de corte após os 15 passes realizados para os diferentes meios lubrirrefrigerantes. A ferramenta utilizada nos passes com utilização de MQL apresentou pouco desgaste ao longo dos 12 primeiros passes realizados. Contudo, a Fig. (2a) mostra a medição de desgaste após o passe 15 realizado nesta condição, que apresentou falhas por entalhe e lascamento da aresta secundária de corte. Nesta imagem, observa-se que o material arrancado da superfície de folga da ferramenta alcançou largura L = 0,266 mm. A falha apresentada pela ferramenta, pode ser atribuída aos aumentos da velocidade de corte (v_c) nos passes 14 e 15. De acordo com a Tab. (1), até o passe 13, $v_c \leq 100$ m/min; depois, a velocidade foi incrementada para 120 m/min no passe 14 e para 140 m/min no passe 15. Esta análise é coerente com o que é apresentado por Diniz *et al.* (2013), que evidenciam que a velocidade de corte é o parâmetro que exerce maior influência no desgaste e redução da vida das ferramentas de corte.



(a) (b) (c)

Figura 2 – Estado da ferramenta após 2,7 min de usinagem para cada condição: (a) MQL; (b) Abundante; (c) Seco.

A ferramenta utilizada nos experimentos com fluido em abundância apresentou desgaste e danos mais severos que com MQL, apresentando desgaste de flanco (L = 0,098 mm) na medição realizada após o passe 3, lascamento (L = 0,221 mm) na medição realizada após o passe 6, e material aderido à aresta de corte com progressão das avarias (L = 0,320 mm) após o passe 9. Resultados semelhantes foram observados após os passes 12 e 15, no qual L = 0,329 mm (Fig. 2b). Assim, conclui-se que as forças de usinagem medidas após o passe 9 com fluído em abundância foram superiores aos passes com MQL por causa da maior intensidade das falhas na ferramenta. Na usinagem a seco ocorreu desgaste de entalhe na aresta de corte na medição realizada após o passe 3 (L = 0,192 mm), e lascamento no passe 6 (L = 0,453 mm). Nas medições seguintes, realizadas nos passes 9, 12 e 15, foram identificadas diferentes formas de material aderido à aresta de corte e uma progressão expressiva do lascamento, atingindo a largura L = 0,802 mm após o

último passe (Fig. 2c). Assim, a usinagem a seco é a condição de corte que oferece maior desgaste da ferramenta, mostrando que a ausência de lubrirrefrigeração dificulta a usinabilidade por fresamento de topo do aço inoxidável super austenítico Ultra® 254 SMO.

3.3 Rugosidade

As rugosidades médias medidas nas superfícies usinadas apresentaram valores considerados baixos em todos os passes ($R_a \leq 0{,}6$ µm) para as três condições de lubrirrefrigeração, podendo ser classificada como uma classe N6 segundo a norma ABNT NBR 8404 (1984). A Figura (3) apresenta o gráfico comparativo dos valores de rugosidade média obtidos. Do passe 1 ao 5, não é possível afirmar que a_p afeta significativamente os valores de R_a, visto que o aumento da força de usinagem (e consequentemente das vibrações) e dos desgastes e avarias na ferramenta de corte prejudicam o acabamento (Machado *et al*., 2015). Contudo, para as condições abundante e MQL, em que as falhas foram observadas somente após os passes 6 e 12, respectivamente, nota-se que $a_p \cong 0{,}5$ mm pode ser benéfico para a qualidade da superfície usinada ($R_a \cong 0{,}3$ µm). Para os passes de 6 a 10, o crescimento de R_a acompanha o incremento de f_z na condição abundante, mostrando que f_z é mais significativo que a ação lubrirrefrigerante. Isso também vale para o corte a seco; contudo, nesta condição, o efeito das falhas na ferramenta também foi grande, o que pode explicar a queda do valor de R_a no passe 10 por causa do aumento do raio de ponta da ferramenta com a avaria (Passari *et al.*, 2022). Para os passes com MQL, a variação dos valores de R_a não foi expressiva com o incremento de f_z ($R_a \cong 0{,}3$ µm), indicando que a ação lubrirrefrigerante é mais significativa, e que os desgastes e as vibrações não comprometeram a qualidade da superfície. Também não se pode afirmar pelos passes 11 a 15 que v_c ou o meio lubrirrefrigerante beneficiam ou prejudicam diretamente o acabamento da superfície usinada, tendo em vista a influência das falhas na ferramenta. Porém, fica evidente os menores valores de rugosidade média no fresamento com MQL ($R_a \cong 0{,}3$ µm) em comparação aos demais meios lubrirrefrigerantes ($R_a \cong 0{,}4$ µm), justamente por causa do melhor estado da ferramenta.

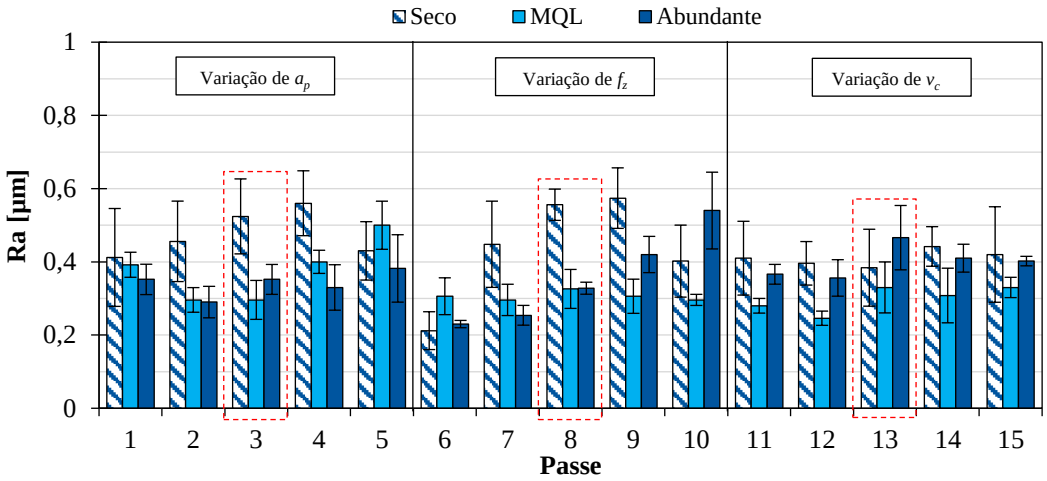


Figura 3 – Gráfico comparativo das rugosidades médias para todos os passes realizados.

De forma geral, os passes a seco apresentaram maior desvio padrão da rugosidade medida, com maior variação do perfil de rugosidade na região usinada. As usinagens com MQL e fluido em abundância apresentaram rugosidades semelhantes, com valores inferiores aos obtidos na usinagem a seco para a maioria dos passes realizados.

4. CONCLUSÕES

A investigação do fresamento de topo do SASS Ultra® 254 SMO demonstrou que a baixa usinabilidade do material resultou em falhas acentuadas na ferramenta de corte após 15 passes (450 mm de comprimento usinado ou tempo de corte de 2,7 min). Os melhores resultados foram obtidos com a utilização de mínima quantidade de lubrificação (MQL), em que a ferramenta apresentou pouco desgaste ao longo dos 12 primeiros passes realizados. A menor taxa de desgaste com o MQL se deve à diminuição do atrito pela ação lubrificante do fluido Way 45-V, aliada à pouca ação refrigerante que não afeta o encruamento no material.

As forças de usinagem se mostraram sensíveis ao incremento de a_p e f_z devido ao aumento da área da seção transversal de corte. Não foram notadas variações significativas com o incremento de v_c. No passe 10 houve um aumento desproporcional de F_U nas condições com fluido em abundância e a seco relacionado a avarias na ferramenta, o que não ocorreu com MQL. Até o passe 9 não se observou diferenças significativas entre os valores de F_U para os três meios lubrirrefrigerantes. No entanto, após o passe 9, o valor médio da força de usinagem aplicando MQL foi 21,3% menor que na usinagem com fluido em abundância e 54,1% menor que no corte a seco.

Em relação a rugosidade média (R_a), não se pode afirmar sobre contribuições de a_p e v_c, devido a influência das avarias na ferramenta durante o processo. Para as condições abundante e MQL, em que as falhas foram observadas somente após os passes 6 e 12, respectivamente, nota-se que $a_p \cong 0{,}5$ mm pode ser benéfico para a qualidade da superfície usinada ($R_a \cong 0{,}3$ µm). No caso do avanço por dente, o crescimento de R_a acompanha o incremento de f_z na condição abundante, mostrando que f_z é mais significativo que a ação lubrirrefrigerante. Idem para o corte a seco; no entanto, o efeito das falhas também foi grande, o que pode justificar a diminuição do valor de R_a no passe 10. No fresamento com MQL, a variação dos valores de R_a não foi expressiva com o incremento de f_z ($R_a \cong 0{,}3$ µm), indicando que a ação lubrirrefrigerante é mais significativa, e que os desgastes e as vibrações não comprometeram a qualidade da superfície.

Como sugestão para trabalhos futuros, propõe-se o isolamento de cada conjunto de parâmetros através da utilização de arestas novas em cada conjunto, observando o comportamento de F_U, de R_a e das falhas nas ferramentas produzidos por cada conjunto. Outra sugestão seria a usinagem deste material em temperaturas elevadas, investigando o efeito do amolecimento térmico, o que traria mais informações sobre o comportamento do Ultra® 254 SMO em relação ao efeito de encruamento.

5. REFERÊNCIAS

Camargo, R, 2008, “Verificação da Usinabilidade dos Aços Inoxidáveis Austeníticos através do Processo de Furação.” Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, UNICAMP, Campinas, SP.

Debnath, S., Reddy, M. M., Yi, Q. S., 2014, “Environmental friendly cutting fluids and cooling techniques in machining: a review”, Journal of Cleaner Production, Vol. 83, pp. 33-47.

Diniz, A. E., Marcondes, F. C. e Coppini, N. L., 2013, “Tecnologia da Usinagem dos Materiais”. 8.ed, Artliber Editora, São Paulo.

Fan, G., Lium, J., Zhang, G., Li, Y., 2020, “Multiple welding simulated microstructure and corrosion resistance of super austenitic stainless steel 254SMO welding heat affected zone”, International Journal of Computational Materials Science and Surface Engineering, Vol. 9, No. 1.

Kaladhar, M., Subbaiah, K. V., Rao, C. H. S., 2012, “Machining of austenitic stainless steels – a review”, International Journal Machining and Machinability of Materials, Vol. 12, No. ½.

Machado, A. R., Abrão, A. M., Coelho, R. T. e Silva, M. B., 2015, “Teoria da Usinagem dos Materiais”. 3.ed., Blucher, São Paulo.

Nayak, S. K., Patro, J. K., Dewangan, S., Gangopadhyay, S., 2014 “Multi-Objective Optimization of Machining Parameters During Dry Turning of AISI 304 Austenitic Stainless Steel Using Grey Relational Analysis”, Procedia Materials Science, Vol. 6, pp. 701 – 708.

Oliveira, J. F. G, Alves, S. M., 2007, “Adequação ambiental dos processos usinagem utilizando produção mais limpa como estratégia de gestão ambiental”. Produção, v. 17, n. 1, p. 129-138.

Passari, É. S., Amorim, H. J. e Souza, A. J., 2022, “Multi-objective optimization of cutting parameters for finishing end milling Hardox® 450”. Journal of Engineering and Technology for Industrial Applications, v. 8, p. 20-28.

Plaut, R. L., Herrera, C., Escriba, D. M., 2007, “A Short Review on Wrought Austenitic Stainless Steels at High Temperatures: Processing, Microstructure, Properties and Performance”, Materials Research, Vol. 10, No. 4, pp. 453-460.

Varghese, V., Chakradhar, D., Ramesh, M. R., 2018, “Micro-mechanical characterization and wear performance of TiAlN/NbN PVD coated carbide inserts during End milling of AISI 304 Austenitic Stainless Steel”, Materials Today: Proceedings, Vol. 5, pp. 12855–12862.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES (Bolsa 2023/840963) pela bolsa de estudos concedida, a empresa Walter Tools, pela doação das ferramentas utilizadas, ao Eng. Abdiel M. Vilanova, pela doação do material, e à empresa Liess – Máquinas e Equipamentos Ltda., pela preparação dos corpos de prova.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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