

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO ÓLEO DE MAMONA APLICADO POR MQL NO FRESAMENTO DE TOPO DO AÇO ASTM A36

Janziliani Herculano Bermudes Pinto ⁽¹⁾ (janzip@gmail.com)

⁽¹⁾ Instituto Federal do Espírito Santo (IFES); PROPEMM

RESUMO: *O uso de fluidos de corte na usinagem é essencial para melhorar a eficiência e a qualidade do processo de fabricação. Este trabalho investiga o desempenho do óleo de mamona puro como fluido de corte no fresamento de topo do aço ASTM A36, comparando-o com a usinagem a seco, com óleo vegetal comercial e com óleo solúvel, utilizando a técnica de Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL). O objetivo foi avaliar a evolução do desgaste das ferramentas de corte, por meio de estéreo microscópio, e a rugosidade superficial das peças usinadas com uso de rugosímetro. Os resultados mostraram que o óleo de mamona apresentou o melhor desempenho em todos os testes realizados, apresentou menor desgaste das ferramentas e em superfícies usinadas, menor rugosidade, comparado com os outros fluidos de corte e com a usinagem a seco. O óleo vegetal também mostrou melhorias em relação à usinagem a seco, mas não alcançou o mesmo nível de desempenho do óleo de mamona. A usinagem a seco e com óleo solúvel apresentaram os piores resultados, confirmando a eficácia do óleo de mamona como fluido de corte superior, sugerindo que sua adoção pode levar a processos de usinagem mais eficientes e sustentáveis.*

PALAVRAS-CHAVE: ÓLEO DE MAMONA, FRESAMENTO DE TOPO, DESGASTE DA FERRAMENTA, RUGOSIDADE SUPERFICIAL, MÍNIMA QUANTIDADE DE LUBRIFICANTE (MQL).

PERFORMANCE EVALUATION OF CASTOR OIL APPLIED BY MQL IN END MILLING OF ASTM A36 STEEL

ABSTRACT: *The use of cutting fluids in machining is essential for improving the efficiency and quality of the manufacturing process. This work investigates the performance of pure castor oil as a cutting fluid in the end milling of ASTM A36 steel, comparing it with dry machining, commercial vegetable oil, and soluble oil, using the Minimum Quantity Lubricant (MQL) technique. The objective was to evaluate the evolution of tool wear using a stereo microscope and the surface roughness of the machined parts using a profilometer. The results showed that castor oil exhibited the best performance in all tests conducted, presenting the least tool wear and the smoothest machined surfaces, compared to other cutting fluids and dry machining. Vegetable oil also showed improvements over dry machining but did not reach the same level of performance as castor oil. Dry machining and machining with soluble oil presented the worst results, confirming the efficacy of castor oil as a superior cutting fluid, suggesting that its adoption could lead to more efficient and sustainable machining processes.*

KEYWORDS: CASTOR OIL, END MILLING, TOOL WEAR, SURFACE ROUGHNESS, MINIMUM QUANTITY LUBRICATION (MQL).

1. INTRODUÇÃO

Pode-se entender usinagem como o processo que, ao conferir forma, dimensão ou acabamento à peça, produz cavaco, que é a porção de material retirado da peça pela ferramenta com forma geométrica irregular (FERRARESI, 1997). Esta é uma definição simplista para um processo complexo que é responsável por garantir a fabricação de diversas peças em vários setores produtivos, em especial no setor metalmeccânico.

Sharma *et al.* (2016) citam que a usinagem desempenha um papel significativo na indústria de manufatura, sendo, talvez, o processo de fabricação mais versátil em que a forma, o tamanho e o acabamento de superfície desejados são alcançados por meio da remoção de materiais em excesso, os pequenos cavacos.

Groover (2014) disserta que dentre os processos de fabricação a usinagem é um dos mais importantes e enumera algumas razões para embasar seu posicionamento, tais como grandes variedades de materiais que podem ser usinados, possibilidade de se criar peças com formas variadas e complexas, confiança na precisão dimensional, dentre outras.

Na indústria mecânica, a usinagem possui papel importante dentre os processos de fabricação e dentre os vários processos de usinagem o fresamento se destaca por sua produtividade e flexibilidade. No fresamento, uma peça é submetida a uma ferramenta rotativa com múltiplas arestas de corte que, à medida que avança perpendicularmente ao eixo de rotação da ferramenta, gera um plano ou superfície reta. O movimento que produz a velocidade de corte é fornecido pela rotação da fresa (ferramenta de corte usada no fresamento) (GROOVER, 2014).

Diniz *et al.* (2006) destacam que o fresamento apresenta grande versatilidade em relação à capacidade de gerar geometrias e custos relativamente reduzidos.

Uma definição para fresamento é dada pela *American Society for Metals* (ASM) como sendo o processo de usinagem no qual, pelo movimento rotativo da ferramenta multicortante, material é removido a cada revolução do eixo árvore. Completando, qualquer superfície pode ser usinada, pois a ferramenta de corte e a peça podem se movimentar em mais de uma direção ao mesmo tempo. Os métodos de fresamento podem ser classificados como fresamento tangencial, frontal e de topo ou misto, que pode ser considerado a junção dos dois primeiros (AMERICAN SOCIETY FOR METALS, 1989).

Fluidos de corte são utilizados na usinagem com o objetivo de melhorar a qualidade da superfície usinada, atendendo a uma rugosidade mínima, e maior vida útil da ferramenta de corte. São tidos como essenciais para o sucesso dos processos de usinagem, porém, alguns problemas são observados com o seu uso abundante, como surgimento de doenças de pele e respiratórias nos operadores, causadas pelo contato direto, ou por meio de vapor do fluido, além de danos ao meio ambiente, quando descartado incorretamente. Além disso, o uso de fluido de corte aumenta consideravelmente os custos de produção.

A escolha adequada do fluido de corte desempenha um papel crucial na eficiência e na qualidade dos processos de usinagem. Em operações de fresamento, a seleção do fluido pode significativamente afetar tanto o desgaste das ferramentas quanto a rugosidade superficial das peças usinadas. Segundo Kalpakjian e Schmid (2014), o uso de fluidos de corte apropriados pode melhorar significativamente a vida útil das ferramentas e a qualidade da superfície das peças.

Neste contexto, o óleo de mamona tem despertado interesse devido às suas propriedades lubrificantes naturais e a capacidade de formar uma película protetora entre a ferramenta de corte e a peça usinada. Estudos recentes têm explorado seu potencial como fluido de corte, especialmente

quando aplicado pela técnica de Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL). De acordo com Machado *et al.* (2009), a técnica MQL tem sido adotada para minimizar o uso de fluidos de corte, promovendo benefícios ambientais e reduzindo custos operacionais.

Este trabalho científico visa avaliar o desempenho do óleo de mamona aplicado por MQL no fresamento de topo do aço ASTM A36, comparando-o com outras técnicas de lubrificação, como usinagem a seco e os óleos vegetal comercial e solúvel. Serão analisados o desgaste das ferramentas de corte e a rugosidade superficial das peças usinadas, com o intuito de fornecer percepções fundamentais para a otimização dos processos de usinagem e a escolha sustentável de fluidos de corte. A técnica de MQL reduz a quantidade de fluido de corte aplicado na região de corte durante o processo de usinagem.

A aplicação de um fluido em forma de névoa também pode trazer riscos para a saúde do operador, incluindo irritação dos olhos, problemas respiratórios devido à inalação da névoa e poluição do ar. Entretanto, essa técnica tem apresentado bons resultados quando comparada com a usinagem a seco e com lubrificantes líquidos aplicados em abundância, com relação às forças de corte, vida da ferramenta de corte, temperatura de usinagem e acabamento superficial (VARADARAJAN *et al.*, 2002).

1.2 Objetivo geral

Avaliar se a utilização do óleo de mamona, como fluido de corte, pela técnica de MQL interfere na qualidade da superfície usinada e no desgaste de ferramenta durante o fresamento de topo do aço ASTM A36, comparada com o uso de óleo vegetal comercial, óleo solúvel aplicados por MQL e usinagem a seco.

1.3 Objetivos específicos

- Analisar as formas e mecanismos de desgaste da ferramenta de corte por meio de estereomicroscópico, para cada processo de fresamento com os três diferentes tipos de fluidos de corte apresentados neste trabalho;
- Analisar o acabamento superficial da peça usinada utilizando os três óleos por meio de rugosímetro;
- Comparar os resultados obtidos com a usinagem a seco para o fresamento proposto.

1.4 Justificativa

A pesquisa sobre o uso de óleo de mamona como fluido de corte na usinagem é relevante devido às suas propriedades lubrificantes naturais, biodegradabilidade e menor impacto ambiental em comparação aos lubrificantes tradicionais derivados de petróleo. Além de promover a sustentabilidade, o óleo de mamona pode melhorar a eficiência e a qualidade do acabamento das peças, oferecendo benefícios econômicos e ambientais. Esta investigação alinha-se com os objetivos de desenvolvimento sustentável e inovação tecnológica na indústria de usinagem.

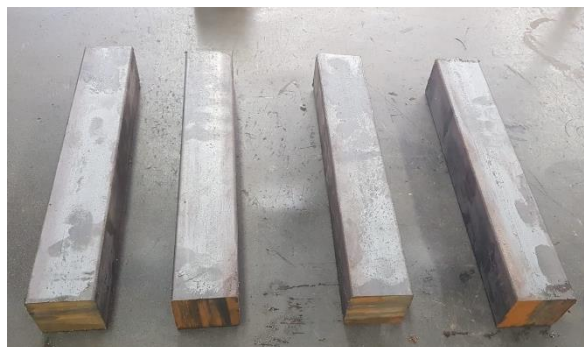
2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Aço

Foi utilizado o aço ASTM A36, fornecido pela RDG Aços do Brasil S/A.

Para análise foi utilizada uma barra quadrada de 2” x 6 m que foi cortada em corpos de prova de 400 mm, sendo utilizados 4 corpos de prova para cada usinagem, com os três óleos citados ao norte e na usinagem a seco.

FIGURA 1. Corpos de prova



Fonte: Autor (2024)

2.2 Equipamentos

A usinagem foi realizada no centro de usinagem CNC Romi D-600, mostrada na Figura 2, instalada no Laboratório de Usinagem do IFES – Instituto Federal de Educação Tecnológica do Espírito Santo - *Campus* Vitória, doravante denominado apenas de IFES.

A máquina possui o eixo-árvore (*spindle*) na vertical com rotação de 7000 rpm com potência de 15 KW/ 20 CV, cone do eixo árvore ISO 40 e comando FANUC *Series* Oi-MC, com velocidade de corte de 220 m/min, profundidade de corte de 2 mm, avanço por dente de 0,15 mm /rotação.

FIGURA 2. Centro de usinagem CNC Romi D-600



Fonte: Autor (2024)

Para realização da aplicação do fluido de corte por nebulização, foi utilizado um dispositivo dosador LUBEMQ, regulado para uma vazão de óleo de 40 ml/h, com um fluxo de ar com 0,5 MPa (5 bar) de pressão.

FIGURA 3. Dispositivo dosador LUBEMQ



Fonte: Autor (2024)

Para medição de rugosidades foi utilizado um rugosímetro portátil digital Mitutoyo modelo SJ-210.

Como ferramentas de corte foram utilizadas 8 pastilhas AQMT123604PEER VP15TF – MITSUBISHI.

O monitoramento do desgaste foi feito utilizando um estéreo microscópio modelo EZ4HD, marca Leica com ampliação de 10X, com auxílio do software Leica LAS EZ da empresa Leica Microsystems GmbH.

Na aplicação por MQL foram utilizados óleo vegetal Super Fluido de Corte 3 Ecologic Quimatic Tapmatic, Óleo solúvel Semissintético Ecológico Quimatic Tapmatic e óleo de mamona 100% natural Distriol.

FIGURA 4. Fluidos utilizados



Fonte: Autor (2024)

Com o objetivo de apresentar dados comparativos da qualidade da superfície usinada e do desgaste da ferramenta no processo de fresamento de topo do aço ASTM A36, utilizando como fluidos de corte óleo de mamona, óleo vegetal comercial e óleo solúvel, aplicados por meio de Mínima Quantidade de Lubrificação (MQL). Para a realização dos ensaios, foram confeccionados corpos de prova de aço ASTM A36 no laboratório do IFES.

Os ensaios de fresamento foram conduzidos com a aplicação dos fluidos de corte a uma pressão de 5 bar. Após o processo de usinagem, foi realizada a análise do desgaste da ferramenta de corte utilizando um estéreo microscópio, com avaliações realizadas a cada três passes, totalizando 60 passes.

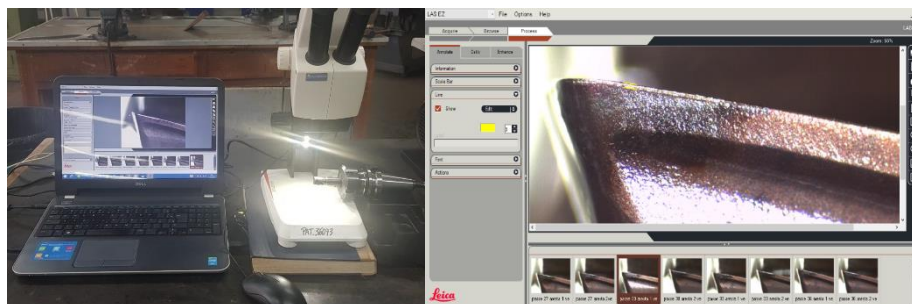
Além disso, foi efetuada a análise do acabamento superficial das peças usinadas por meio de um rugosímetro. A medição da rugosidade foi realizada perpendicularmente às marcas de usinagem nos corpos de prova, em seis pontos distintos, sendo três no sentido concordante e três no sentido discordante da usinagem.

3. RESULTADOS

3.1 Ensaios de vida das ferramentas

Os corpos de prova foram usinados com 2 pastilhas, cada uma dessas ferramentas foi analisada no estéreo microscópio, conforme Figura 5.

FIGURA 5. Análise do desgaste das ferramentas



Fonte: Autor (2024)

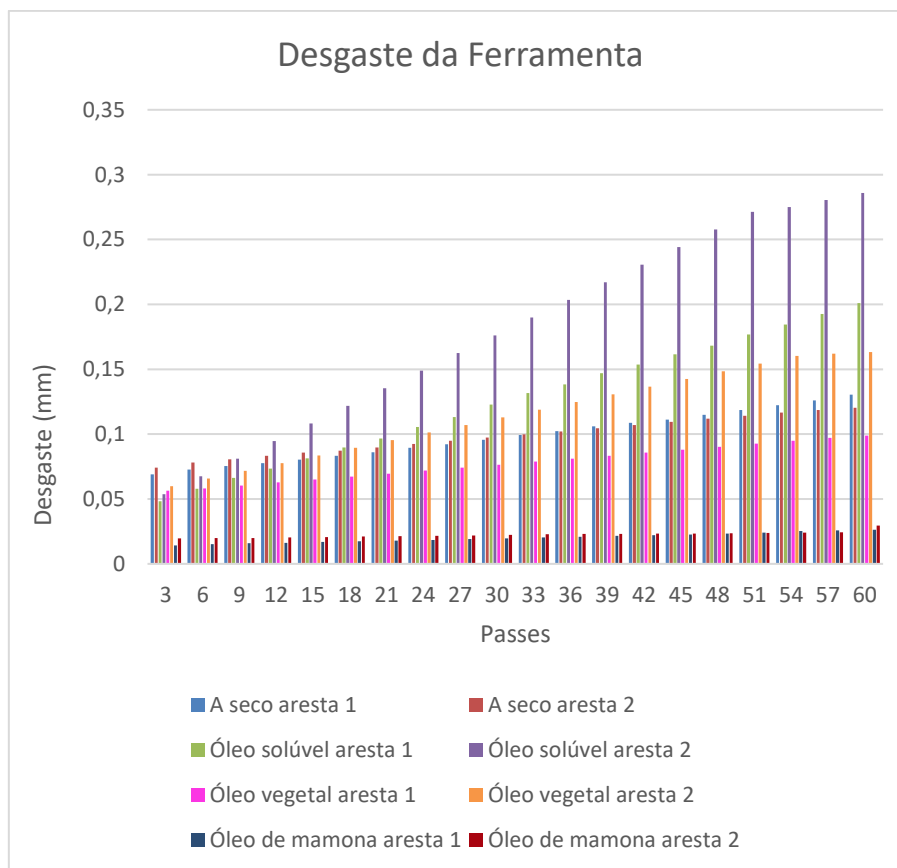
A seguir, faz-se uma comparação entre a evolução do desgaste das ferramentas de acordo com o fluido de corte utilizado e com a usinagem a seco. Essa comparação é apresentada na Tabela 1 e no Gráfico 1.

TABELA 1. Evolução do desgaste das ferramentas

Passe	A seco		Óleo solúvel		Óleo vegetal		Óleo de mamona	
	aresta 1	aresta 2	aresta 1	aresta 2	aresta 1	aresta 2	aresta 1	aresta 2
3	0,0691	0,0742	0,0482	0,0538	0,0563	0,0599	0,0142	0,0197
6	0,0728	0,0781	0,0578	0,0674	0,0581	0,0658	0,0151	0,0199
9	0,0753	0,0805	0,0663	0,0810	0,0604	0,0717	0,0159	0,0200
12	0,0776	0,0832	0,0735	0,0946	0,0627	0,0776	0,0162	0,0203
15	0,0804	0,0857	0,0812	0,1082	0,0650	0,0835	0,0168	0,0207
18	0,0832	0,0873	0,0897	0,1218	0,0673	0,0894	0,0174	0,0211
21	0,0861	0,0898	0,0965	0,1354	0,0696	0,0953	0,0180	0,0213
24	0,0895	0,0924	0,1054	0,1490	0,0719	0,1012	0,0185	0,0215
27	0,0923	0,0949	0,1132	0,1626	0,0742	0,1071	0,0191	0,0219
30	0,0957	0,0973	0,1228	0,1762	0,0765	0,1130	0,0197	0,0223
33	0,0994	0,0998	0,1316	0,1898	0,0788	0,1189	0,0203	0,0229
36	0,1022	0,1021	0,1384	0,2034	0,0811	0,1248	0,0208	0,0231
39	0,1060	0,1045	0,1469	0,2170	0,0834	0,1307	0,0215	0,0231
42	0,1087	0,1070	0,1537	0,2306	0,0857	0,1366	0,0221	0,0233
45	0,1113	0,1094	0,1615	0,2442	0,0880	0,1425	0,0227	0,0234
48	0,1149	0,1118	0,1682	0,2578	0,0903	0,1484	0,0234	0,0236
51	0,1186	0,1142	0,1768	0,2714	0,0926	0,1543	0,0240	0,0239
54	0,1223	0,1166	0,1845	0,2750	0,0949	0,1602	0,0252	0,0241
57	0,1259	0,1185	0,1927	0,2804	0,0971	0,1620	0,0258	0,0244
60	0,1304	0,1204	0,2010	0,2859	0,0988	0,1632	0,0263	0,0295

Fonte: Autor (2024)

GRÁFICO 1. Evolução do desgaste das ferramentas



Fonte: Autor (2024)

Durante a usinagem a ferramenta aquece no período em que há formação de cavacos, o chamado período ativo e esfria no período inativo, quando não há formação de cavaco, causando flutuações cíclicas das tensões na superfície da ferramenta de corte (Machado *et al.*, 2011). Quanto maiores essas diferenças de temperaturas, maiores serão as tensões, aumentando o desgaste da ferramenta e consequentemente, diminuindo a vida útil da ferramenta. Assim, ao utilizar fluidos de corte como refrigerantes, a tendência é que as temperaturas se aproximem diminuindo o desgaste da ferramenta.

Ao analisar os dados da tabela 1 e do gráfico 1, pode-se perceber que a usinagem utilizando como fluido de corte o óleo solúvel apresentou o pior desempenho em relação a desgaste das ferramentas, seguido da condição a seco e da condição com fluido vegetal. O melhor desempenho, ou menor desgaste de ferramentas, pode ser percebido ao analisar a condição de usinagem utilizando o óleo de mamona como fluido de corte.

O óleo de mamona apresenta viscosidade elevada, então, na área de contato entre ferramenta e peça há maior aderência do fluido, assim, credita-se a isso o bom desempenho do fluido.

3.2 Rugosidade superficial da peça usinada

A rugosidade superficial pode influenciar a resistência ao desgaste, a capacidade de carga, a resistência à fadiga e o comportamento tribológico das peças. Diversos fatores influenciam a rugosidade, incluindo os parâmetros de corte, as condições da ferramenta e as propriedades do material usinado.

A medição da rugosidade foi feita após o terceiro passe, ou seja, com as ferramentas de corte ainda novas para que seu desgaste não interferisse no resultado.

Parâmetros como Ra (rugosidade média aritmética), Rz (altura média das irregularidades), Rt (altura total do perfil) e Rq (rugosidade média quadrática) são comumente utilizados para quantificar a rugosidade (SANDVIK COROMANT, 2010). Esses parâmetros fornecem uma descrição detalhada da qualidade superficial e são essenciais para o controle de qualidade e a otimização dos processos de usinagem.

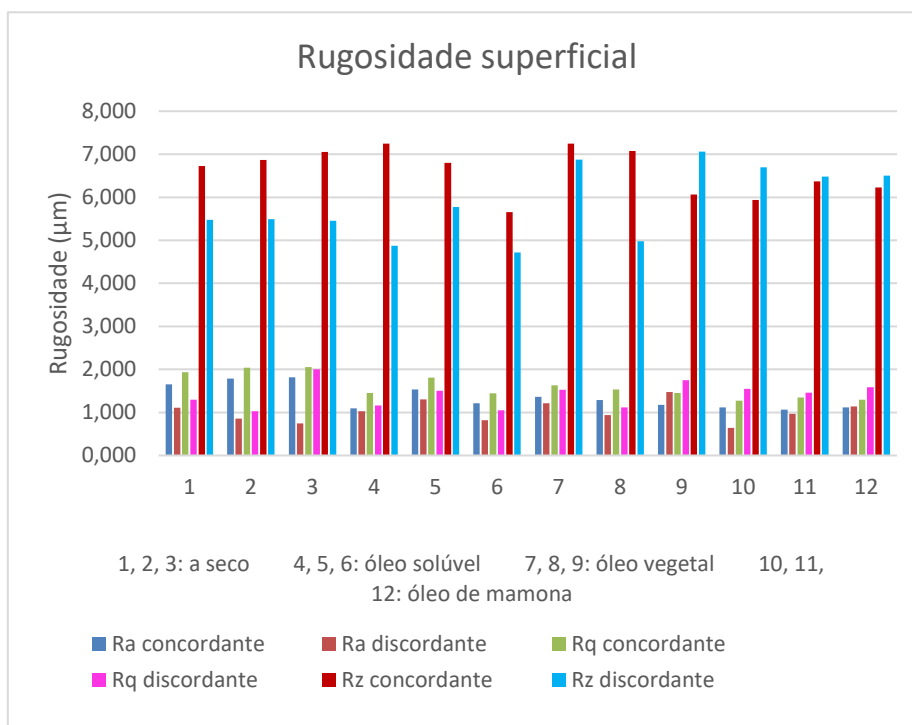
O Gráfico 2 representa os mesmos valores da Tabela 2; pode-se perceber que o óleo de mamona apresentou melhor resultado quando analisada a variável rugosidade superficial da peça usinada.

TABELA 2. Rugosidade superficial da peça usinada

Fluidos	Ra		Rq		Rz	
	concor- dante	discor- dante	concor- dante	discor- dante	concor- dante	discor- dante
a seco	1,653	1,109	1,939	1,299	6,725	5,475
	1,788	0,855	2,040	1,026	6,864	5,491
	1,815	0,749	2,057	2,006	7,050	5,453
solúvel	1,094	1,026	1,453	1,164	7,245	4,872
	1,535	1,300	1,809	1,503	6,797	5,776
	1,216	0,821	1,448	1,053	5,658	4,716
vegetal	1,363	1,214	1,627	1,526	7,249	6,875
	1,291	0,936	1,532	1,121	7,079	4,976
	1,175	1,477	1,451	1,752	6,064	7,060
ma- mona	1,115	0,643	1,276	1,547	5,941	6,700
	1,065	0,966	1,351	1,462	6,372	6,481
	1,118	1,138	1,293	1,586	6,230	6,503

Fonte: Autor (2024)

GRÁFICO 2. Rugosidade superficial da peça usinada



Fonte: Autor (2024)

3.3 Análise do cavaco

A Figura 6 mostra os cavacos que foram coletados ao longo da usinagem dos corpos de prova.

A análise de cavacos na usinagem é uma prática essencial na usinagem, oferecendo informações cruciais sobre o desempenho do processo de corte e a qualidade final das peças. A forma e a estrutura dos cavacos são indicativos das condições de corte e do comportamento dos materiais durante a usinagem. Diferentes tipos de cavacos refletem variações nos parâmetros de processo e nas propriedades dos materiais.

FIGURA 6. Cavacos coletados durante o processo de usinagem

(a) usinagem a seco



(b) usinagem com óleo solúvel



(c) usinagem com óleo vegetal



(d) usinagem com óleo de mamona



Fonte: Autor (2024)

Analizando os cavacos obtidos nas quatro condições de usinagem, percebe-se que o formato não apresenta diferenças significativas, predominando o tipo cavaco quebrado, curtos e divididos em pedaços pequenos, o que é frequentemente desejável, pois indicam uma boa fragmentação do cavaco e menos problemas de manuseio. Este tipo de cavaco é frequentemente obtido com a aplicação adequada de quebra-cavacos e condições de corte otimizadas (SANDVIK COROMANT, 2010).

A única diferença perceptível é em relação à cor dos cavacos; na usinagem a seco eles se apresentam de cor escura, indicando maior temperatura durante o processo de usinagem.

4. CONCLUSÕES

Este trabalho analisou o desempenho do óleo de mamona como fluido de corte no fresamento de topo do aço ASTM A36, em comparação com a usinagem a seco, com óleo vegetal e óleo solúvel. Foram avaliadas a evolução do desgaste das ferramentas de corte e a rugosidade superficial das peças usinadas, com todos os fluidos aplicados utilizando a técnica de Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL).

Os resultados demonstraram que o óleo de mamona apresentou o melhor desempenho em todos os testes realizados. Especificamente, observou-se que o uso do óleo de mamona resultou em uma menor taxa de desgaste das ferramentas de corte em comparação com os outros métodos. Este desempenho superior pode ser atribuído às excelentes propriedades lubrificantes e de viscosidade do óleo de mamona, que proporcionaram uma película lubrificante eficiente entre a ferramenta de corte e a peça usinada, reduzindo o atrito e o calor gerado durante o processo de fresamento.

Além disso, a análise da rugosidade superficial das peças usinadas revelou que o óleo de mamona proporcionou superfícies mais lisas, com valores de rugosidade significativamente menores em relação aos outros fluidos testados e à usinagem a seco. Isso pode ser atribuído à capacidade do óleo de mamona de reduzir a formação de rebarbas e deformações plásticas durante o corte, resultando em uma superfície de melhor qualidade.

Os testes com óleo vegetal e óleo solúvel também mostraram melhorias em relação à usinagem a seco, mas não alcançaram o desempenho observado com o óleo de mamona. A usinagem a seco e com óleo solúvel apresentou os piores resultados, com maior desgaste das ferramentas e rugosidade superficial, destacando a importância do uso de fluidos de corte apropriados para otimizar o processo de usinagem.

Em conclusão, este estudo confirma a eficácia do óleo de mamona como um excelente fluido de corte no fresamento de topo do aço ASTM A36, superando tanto a usinagem a seco quanto o uso de outros óleos vegetais e solúveis. A técnica de MQL, combinada com o óleo de mamona, oferece uma solução sustentável e eficiente, melhorando significativamente a vida útil das ferramentas de corte e a qualidade superficial das peças usinadas. Estes resultados têm implicações práticas importantes para a indústria de manufatura, sugerindo que a adoção do óleo de mamona pode levar a processos de usinagem mais eficientes e ecológicos.

DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis por este trabalho.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY FOR METALS. Metals handbook. Metals Park, Ohio: ASM International, 1989.
- DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. Tecnologia da usinagem dos materiais. Artiliber Editora Ltda., Campinas, SP, Brasil, 6ª Edição, p.165-170, 2008
- FERRARESI, d. Fundamentos da usinagem dos metais. São Paulo: Blucher, 1977.
- GROOVER, Mikell P. Introdução aos Processos de Fabricação. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda., 2014.
- KALPAKJIAN, S.; SCHMID, S. R. Manufacturing Engineering and Technology. 7th ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson, 2014.
- MACHADO, A. R.; DA SILVA, M. B.; ABRÃO, A. M. Teoria da Usinagem dos Materiais. Editora Blucher, São Paulo, 2009.
- MACHADO, A. R.; ABRAÃO, A.; COELHO, R. T.; SILVA, M. B. Teoria da Usinagem dos Materiais. 2ed., Editora Blucher, São Paulo, 2011.
- SANDVIK COROMANT. Modern Metal Cutting: A Practical Handbook. Sandviken: Sandvik Coromant, 2010.
- SHARMA, Anuj Kumar; TIWARI, Arun Kumar, DIXIT, Amit Rai. Effects of Minimum Quantity Lubrication (MQL) in machining processes using conventional and nanofluid based cutting fluids: A comprehensive review. Journal of Cleaner Production. Dhanbad, India, Mathura, India, p. 1-18. Abr. 2016. Disponível em: <https://pdf.sciencedirectassets.com/271750/1>. Acesso em: 09 jun. 2024.
- VARADARAJAN, A.S., Philip, P.K., Ramamoorthy, B. Investigations on hard turning with minimal cutting fluid application and its comparison with dry and wet turning. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2002.