

APLICAÇÃO DE CONCEITOS DE USINAGEM SUSTENTÁVEL NO FRESAMENTO DO AÇO ABNT 4140

Cayo Lourenço Bassi¹
Gil Magno Portal Chagas²

RESUMO

Dentre os processos de manufatura de peças, um dos mais importantes e utilizados é a usinagem, que é responsável por transformar um material bruto em uma peça com dimensões, tolerâncias e acabamento superficial bem definidos. Entretanto, durante o processo muitas vezes são gerados resíduos que afetam o meio ambiente. Assim, é importante que o processo, além de atender aos requisitos de produtividade, seja sustentável e reduza o desperdício de materiais e energia, buscando o equilíbrio entre a saúde e o meio ambiente. Dessa forma, este artigo busca avaliar métodos de corte a seco, resfriamento com tubo de vortex e MQL no fresamento de um aço ABNT 4140 com uma fresa de topo de 16 mm com insertos intercambiáveis de metal duro. Foram medidas a potência de consumida, a rugosidade e o desgaste de ferramenta para cada condição testada. Os melhores resultados obtidos foram com o resfriamento com tubo de vortex.

Palavras-chave: fresamento; usinagem sustentável; MQL; tubo de vortex; aço ABNT 4140.

APPLICATION OF SUSTAINABLE MACHINING CONCEPTS IN THE MILLING OF ABNT 4140 STEEL

Abstract

Among the manufacturing processes of parts, one of the most important and used is machining, which is responsible for transforming a raw material into a part with well-defined dimensions, tolerances and surface finish. However, during the process, waste that pollutes the environment is often generated. Therefore, it is important that the process, in addition to meeting productivity requirements, is sustainable and reduces waste of materials and energy, seeking a balance between health and the environment. Therefore, this article seeks to evaluate dry cutting, vortex tube cooling and MQL methods in the milling of ABNT 4140 steel with a 16 mm end mill with indexable carbide inserts. The power consumption, roughness and tool wear were measured for each condition tested. The best results obtained were with vortex tube cooling.

Keywords: milling; sustainable machining; MQL; vortex tube; ABNT 4140 steel.

¹Estudante do Curso Superior de Tecnologia em Fabricação mecânica no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Câmpus Jaraguá do sul - Rau. E-mail: cayobassi@gmail.com

²Doutor em Engenharia Mecânica. Professor do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Câmpus Jaraguá do sul - Rau. E-mail: gilchagas@ifsc.edu.br



INTRODUÇÃO

A usinagem é um processo de manufatura amplamente utilizado na fabricação de componentes metálicos. Este processo tem como característica a transformação de um componente bruto em um produto com elevada precisão e bom acabamento (BOGATYREVA *et al.*, 2019).

Durante o processo de usinagem, a ferramenta remove o material da peça em forma de cavaco. Este processo é realizado em velocidades muito elevadas, com altas taxas de deformação plástica e atrito entre a interface da ferramenta e a peça, o que gera calor excessivo na região (ABDELAOUI *et al.*, 2023).

Uma forma de reduzir os efeitos de aquecimento e desgaste no processo é com a utilização de fluido de corte, que é aplicado em forma de jato abundante na região entre a ferramenta e a peça. Os fluidos de corte são utilizados na usinagem para aumentar a vida da ferramenta, melhorar o acabamento da peça, reduzir o aquecimento na região de corte e ajudar a remover os cavacos (QUEIROZ; BRITO, 2023).

Segundo Ravi *et al.* (2021), as principais funções do fluido de corte são a refrigeração e lubrificação no processo de usinagem. Entretanto, o uso do fluido em velocidade de corte muito elevada não é favorável para a penetração na interface entre a ferramenta e a peça, diminuindo a eficácia na lubrificação. Neste caso, a principal função do fluido é a refrigeração do processo e a redução da temperatura na ferramenta e na peça.

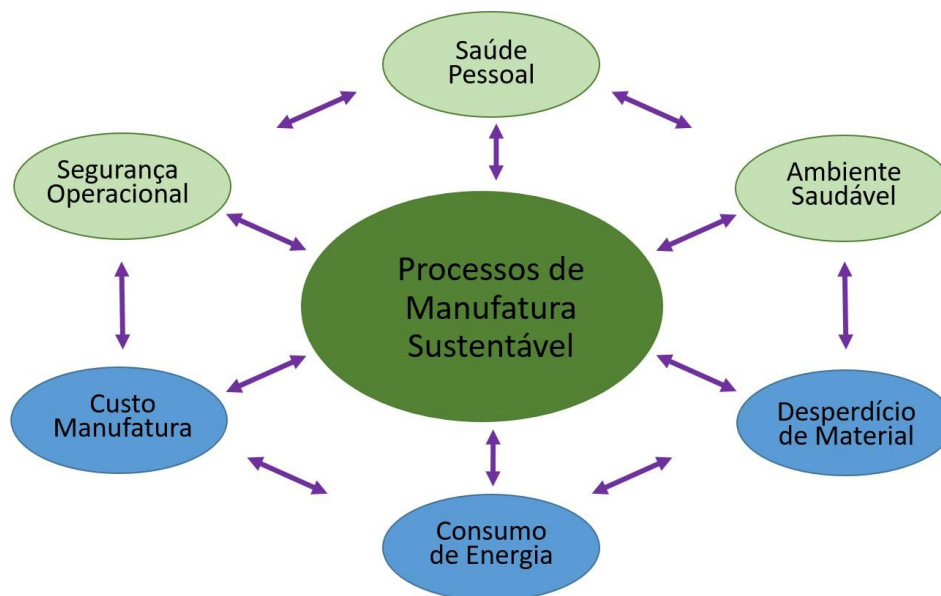
Contudo, a utilização de fluidos na usinagem apresentam alguns problemas. O custo de utilização destes fluidos é elevado. Sua utilização está relacionada a problemas de saúde do operador e o descarte deste produto é complexo, devido ao seu potencial de degradação do meio ambiente. Com isso são necessários licenciamento ambiental para o descarte, o que faz com que esse processo e a reciclagem se torne caro e necessário (PEREIRA, 2022).

Atualmente, segundo Jozić *et al.* (2015), o objetivo do processo de usinagem é aumentar sua produtividade reduzindo os impactos e recursos envolvidos. Desta forma aumentando a capacidade e o lucro das empresas sem afetar o meio ambiente. Assim, a escolha dos melhores métodos são fatores decisivos.

Ghatge e Ramanujam (2023), complementam o conceito de manufatura sustentável, que tem como objetivo reduzir os efeitos deletérios no ambiente, reduzir a energia consumida, os recursos naturais, os perigos na saúde dos operadores, comunidades e clientes, tornando-se economicamente sustentável. Em resumo, é a habilidade de processos, sistemas e produtos, preparados de forma eficiente sem afetar o meio ambiente.

A Figura 1 apresenta os processos envolvidos no conceito de manufatura sustentável, no qual os objetivos estão relacionados a redução dos desperdícios de material, na redução do consumo de energia, na saúde pessoal, segurança operacional e um meio ambiente saudável (JOZIĆ *et al.*, 2015).

Figura 1 - Representação dos processos que se relacionam para sustentabilidade na manufatura



Fonte: Adaptado de Jozić *et al.* (2015)

O principal conceito de sustentabilidade na usinagem está em abranger as questões econômicas, sociais e ambientais. Para atender as necessidades de uma usinagem sustentável, busca-se englobar os seguintes fatores (GHATGE; RAMANUJAM, 2023):

- Menor consumo de energia
- Menos desperdício de matéria-prima
- Melhor eficiência nos processos
- Melhor saúde e segurança aos operadores
- Redução de emissão de poluentes
- Redução de resíduos que impactam o meio ambiente

Dentre os diversos estudos realizados sobre sustentabilidade na usinagem os tipos que mais se caracterizam dentro do conceito são os de corte a seco, uso de Mínima Quantidade de Lubrificantes (MQL) e o resfriamento da peça em baixas temperaturas (SHUKLA; KOTWANI; UNUNE, 2020).



O corte a seco caracteriza-se por ocorrer sem o uso de lubrificantes. Com isso, reduz os riscos à saúde ocupacional, contaminação, o custo de aquisição e reciclagem destes fluidos no processo de usinagem. Entretanto, o processo a seco, apesar de diminuir a emissão de poluentes ao ambiente, gera um maior atrito e aquecimento entre a peça e a ferramenta (SHUKLA *et al.*, 2023).

Dessa forma, este processo a seco tende a causar um aumento de consumo de energia, redução na qualidade superficial da peça e maior desgaste da ferramenta. Segundo Oliveira *et al.* (2019), em testes de fresamento é possível analisar na prática que gera um desgaste de ferramenta e rugosidade muito superior, se comparado aos que usam fluidos no mesmo processo.

Gruner, Silva e Carlini (2022) avaliaram o desgaste de ferramenta no fresamento a seco de um aço D6 e confirmaram que este processo tende a gerar grande desgaste de ferramentas, com possível lascamento do seu gume. Isso ocorre devido ao grande esforço de corte e ao elevado aquecimento da ferramenta.

Na busca por gerar menos resíduos nocivos ao meio ambiente foi criado o método da mínima quantidade de lubrificante (MQL). Este método consiste na pulverização do fluido, aplicando ar comprimido com uma pequena quantidade de lubrificante. Segundo ŞIRIN e KđVAK(2019) o método tem demonstrado bons resultados em processos de fresamento.

Vários estudos sobre o efeito do MQL na usinagem, apresentam um bom desempenho na questão de desgaste de ferramenta, temperatura de corte e no consumo de energia, quando comparado com o corte a seco. Salur *et al.* (2021) avaliou a aplicação do MQL no fresamento de um aço AISI 1040 e constatou que obteve uma melhora de 30,9% no desgaste de flanco, 32,5% de redução na temperatura e de 16,9% consumo de energia em relação ao corte a seco.

Outra tecnologia que vem sendo testada na usinagem visando melhorar a sustentabilidade do processo é a aplicação de refrigeração no processo de corte, com a utilização da criogenia. Ela consiste no uso de gases super comprimidos, normalmente Nitrogênio - LN₂ ou Gás Carbônico Líquido - LCO₂, em temperaturas extremamente baixas. Uma das grandes vantagens é que em sua aplicação não gera resíduos poluentes ao meio ambiente (BENEDICTO; CAROU; RUBIO, 2017).

A maioria da aplicação da criogenia na usinagem ocorre em aços mais duros e busca reduzir o calor gerado no atrito da ferramenta e conseqüentemente o seu desgaste. Khanna, Shah e Chetan (2020), fizeram análises comparativas na usinagem de um aço 5-5 PH SS (AMS 5659), e constataram que o uso do resfriamento ajudou a gerar um menor desgaste da ferramenta, uma redução do consumo de energia, menores cavacos no processo de usinagem e uma tendência na redução da rugosidade.

O uso dessa técnica já vem ajudando a reduzir os impactos e custos para a manufatura de produtos. Entretanto, conforme o conceito de usinagem sustentável, é importante buscar métodos para reduzir o consumo de energia e ter uma maior eficiência no processo (GHATGE; RAMANUJAM, 2023).

Contudo, para a fabricação de sistemas de resfriamento que utilizam Nitrogênio ou Gás Carbônico líquido são necessários processos químicos nocivos ao meio ambiente. O uso desses dois elementos químicos contribui também para o desequilíbrio do meio ambiente e ajuda a aumentar o aquecimento global. Por esse motivo, muitos estudos estão sendo feitos para a utilização do Tubo de vortex de Ranque-Hilsch na usinagem (MODESTO; JUNIOR; CEKINSKI, 2021).

O Tubo de vortex tem uma funcionalidade semelhante ao resfriamento criogênico, ele utiliza ar comprimido em um sistema mecânico fixo que gera um vórtice interno. Esse sistema faz a separação de vórtice em ar quente de baixa pressão e o ar frio de alta pressão, fazendo com que cada um seja direcionado por um lado, conforme a Figura 2 (PENILLAS; MARIANI, 2023).

Segundo Arruda e Brandão (2018), o sistema de resfriamento com tubo de vortex pode reduzir o calor, melhorar a tolerância dimensional e a qualidade superficial da peça. Em testes de torneamento de um aço API 5L X70 foi relatado um aumento de 22% na vida útil da ferramenta de corte (velocidade de corte 300 m/min, avanço de 0,2 mm/rev e profundidade ap de 0,8mm). Com velocidade de 600 m/min chegou a cerca de 32% de aumento na vida útil da ferramenta.

Figura 2 - Representação do funcionamento do sistema de resfriamento vortex de Ranque-Hilsch



Fonte: Adaptado de Jozić *et al.* (2015)



Assim, esse trabalho visa aplicar conceitos de manufatura sustentável na usinagem relacionados a saúde, segurança e preservação do meio ambiente, bem como a produtividade do processo, com redução do consumo de energia e desperdício.

Dessa forma, o objetivo deste trabalho é avaliar diferentes métodos de refrigeração sustentáveis no processo de usinagem e verificar a diferença entre os métodos a seco, com MQL, resfriamento a frio e resfriamento a frio+MQL em um processo de fresamento de uma liga de aço ABNT 4140 com uma fresa de topo de 16mm com dois insertos intercambiáveis. Os possíveis efeitos na produtividade do processo são verificados nos resultados de desgaste de ferramenta, rugosidade e o consumo energético dos métodos de resfriamento na usinagem.

METODOLOGIA

O material escolhido para os ensaios foi uma peça de aço de baixa liga ABNT 4140, que é uma série Cr-Mo e possui uma alta resistência e temperabilidade. A Tabela 1 apresenta a composição química do Aço ABNT 4140. A peça testada possui a dimensão de 245 mm de diâmetro e altura de 55 mm.

Tabela 1 – Composição química do Aço ABNT 4140

Aço (UNS)	C	Si	Mn	P (≤)	S (≤)	Cr	Mo
4140	0,38-0,43	0,15-0,35	0,75-1,00	0,035	0,040	0,80-1,10	0,15-0,25

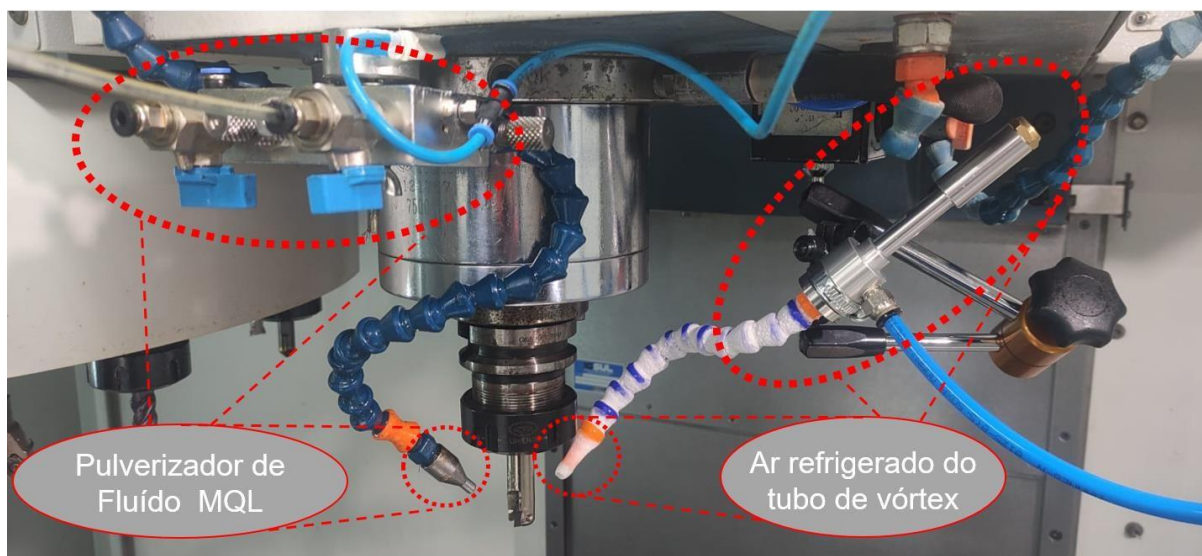
Fonte: Norma NBR NM 87:200.

A ferramenta utilizada foi uma fresa de topo intercambiável da marca WTools modelo 90GR BT999-16-2L-APLX10-AL, de 16 mm com 2 arestas de corte. Nessa fresa foi usado o inserto da marca WTools modelo APKT100308 PDTR WT3000, que possui ângulo de folga de 11° e raio de 0,08 mm.

O tipo de lubrificante MQL usado foi o Quimatic Jet ecológico da marca Quimatic composto por fluido a base de água para metais ferrosos, aço inox e pastilhas de metal duro. Para a aplicação do MQL utilizou-se o Nebulizador V Tapmatic (Figura 2) da marca Quimatic com uma saída independente de mangueira de direcionamento e uma vazão de 160 ml/h.

Já no teste do processo com resfriamento, foi utilizado o Tubo de vortex modelo SE- WLG08 conectado diretamente ao ar comprimido do centro de usinagem, conforme Figura 3. Foi constatado através de teste com multímetro digital Minipa modelo ET-2042f com um termopar acoplado que o tubo de vortex chegou a temperatura de trabalho de -18 °C

Figura 3 - Montagem do resfriamento vortex de Ranque-Hilsch e do Nebulizador V Tapmatic



Fonte: O autor (2024).

Para a realização deste artigo foi utilizado o centro de usinagem CNC da marca Romi modelo D600 com rotação máxima de 7500 rpm. A fixação da ferramenta foi realizada com pinça do próprio centro de usinagem Romi e para a fixação da peça foram usados dois grampos manuais. Os parâmetros de usinagem utilizados nos testes são apresentados na Tabela 2. Em todos os experimentos foram utilizados o trajeto do tipo Zigzag programado através do software EdgeCam.

Tabela 2 – Parâmetros e testes realizados

Experimento	Lubrificação	Velocidade de corte (V_c)	Velocidade de avanço (V_f)	a_p	a_e
1	Seco	200 m/min	795 mm/min	3 mm	2 mm
2	Resfriamento	200 m/min	795 mm/min	3 mm	2 mm
3	MQL	200 m/min	795 mm/min	3 mm	2 mm
4	MQL + resfriamento	200 m/min	795 mm/min	3 mm	2 mm

Fonte: O autor (2024).

Para os resultados de consumo de energia foi utilizado o multímetro Minipa modelo ET-3166 e coletado o valor da corrente em uma fase do motor, no início da peça e no final de cada passe.

Foi utilizado o rugosímetro digital TR210 para a coleta de dados sobre a rugosidade média Ra. Em cada um dos métodos foi coletado os dados de rugosidade em 3 partes distintas da peça.

A coleta dos resultados de desgaste foi realizada ao final de dois passes completos do mesmo tipo de lubrificação. Esses dois passes correspondem a um volume de material removido de 282.861,15 mm³. Para cada um dos tipos de resfriamento foram utilizados um par de inserts novos, a fim de manter a integridade das análises dos dados coletados.

No inserto os pontos analisados foram o desgaste de flanco máximo ($V_{b\max}$) da aresta primária (lateral) e da secundária (frontal), conforme a Figura 4. O desgaste obtido foi medido através do estereoscópio trinocular Zeiss modelo Stemi 2000C, com auxílio do software AxioVision versão 4.8.2 SP2 para a medição e captura das imagens.

Figura 4 - Representação dos pontos de desgaste de aresta primária e secundário no inserto



Fonte: O autor (2024)

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, os resultados obtidos de potência consumida, rugosidade e desgaste de flancos dos inserts são apresentados por meio de tabelas e gráficos, otimizando a análise dos mesmos.

Foram coletadas seis medições da corrente, sendo três no primeiro passe e três no segundo passe e retirada a média dos três valores. A potência aparente foi calculada a partir do valor de corrente média pela equação (1), em que V é a tensão em Volts, I é a média de corrente medida em Amperes

$$P_a = V \cdot I \cdot \sqrt{3} \quad (1)$$

A tabela 3 apresenta os valores de potência aparente calculados.

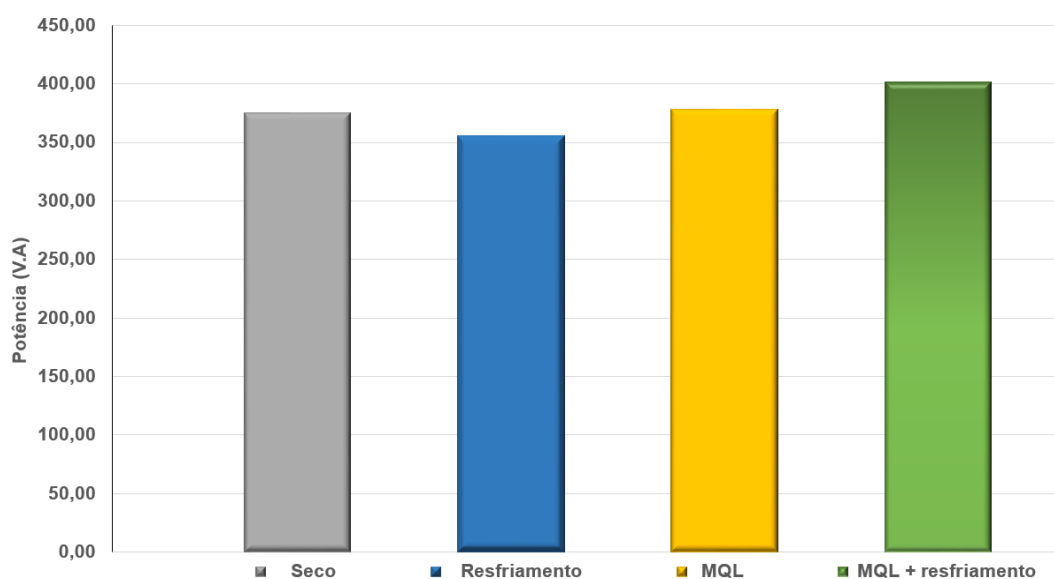
Tabela 3 - Potência aparente consumida (Potência V.A.)

Experimento	Lubrificação	Potência aparente (VA)
1	Seco	375,335
2	Resfriamento	355,520
3	MQL	378,383
4	MQL + resfriamento	401,246

Fonte: O autor (2024).

Na Figura 5 são apresentados os resultados, na forma de gráfico, da potência aparente consumida para os diferentes processos de resfriamento avaliados.

Figura 5 - Gráfico de Potência aparente consumida (Potência V.A.)



Fonte: O autor (2024).

Como é possível observar na figura 5, o que obteve a menor potência consumida foi com resfriamento, obtendo 355,520 V.A. Nesse caso, o resfriamento com ar gelado foi eficaz para reduzir o esforço de corte, quando comparado com os demais métodos.

Por outro lado, os métodos do MQL e MQL+ resfriamento não trouxeram resultados favoráveis quando comparados com o processo a seco, o que não era esperado. Nesse caso, a junção do MQL + resfriamento obteve maior consumo, com um total de 401,246 V.A. Estes

resultados indicam a necessidade de realizar novos estudos com a utilização de outros tipos de fluidos no sistema MQL.

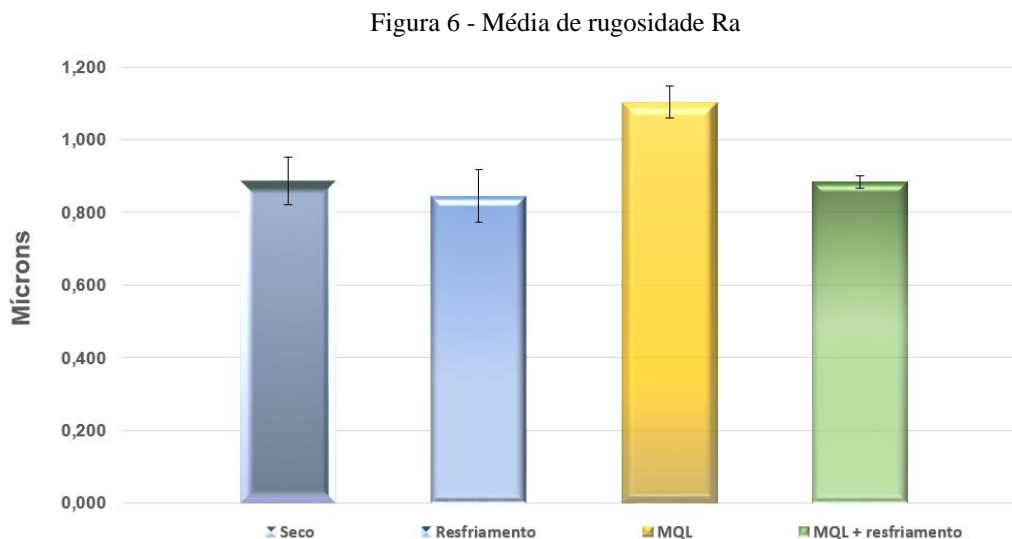
A tabela 4 apresenta os dados das rugosidades Ra obtidas, as médias calculadas e os desvios padrão para cada tipo de lubrificação.

Tabela 4 - Rugosidade Ra em micron (μm) para cada experimento

Experimento	Lubrificação	Ra 1	Ra2	Ra3	Média Ra	Desvio padrão
1	Seco	0,963	0,844	0,854	0,887	0,066
2	Resfriamento	0,927	0,822	0,786	0,845	0,073
3	MQL	1,150	1,064	1,096	1,103	0,043
4	MQL + resfriamento	0,867	0,900	0,881	0,883	0,016

Fonte: O autor (2024).

A figura 6 apresenta os valores de rugosidade média Ra para cada método de refrigeração avaliado.

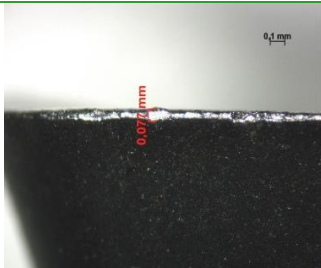
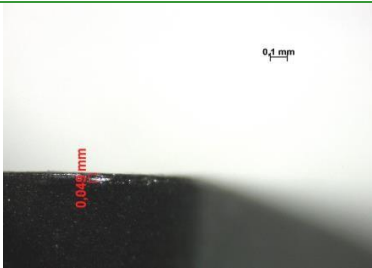
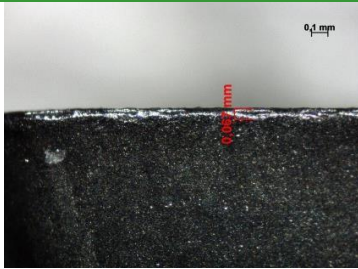
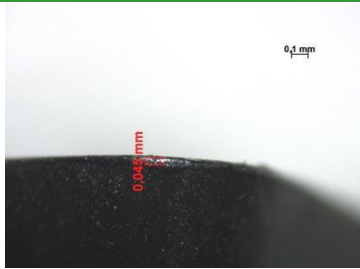
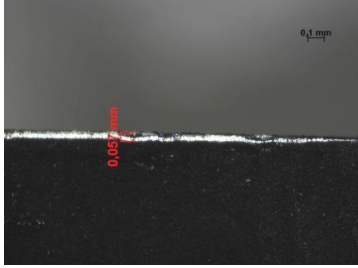
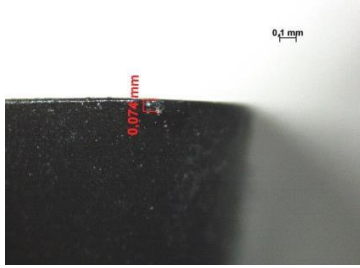
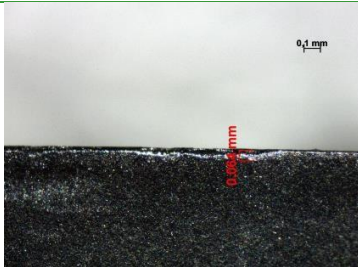
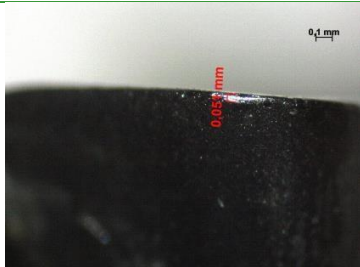


Fonte: O autor (2024).

Conforme é possível observar na Figura 6, o método de resfriamento com ar gelado obteve um resultado melhor na questão de rugosidade, tendo como resultado uma média de $0,845 \mu\text{m}$. E o pior resultado foi MQL com uma média de $1,103 \mu\text{m}$.

A tabela 5 apresenta as imagens do maior desgaste de flanco das arestas principais e secundárias para cada condição de lubrificação avaliada e a tabela 6 os valores de desgaste de flanco obtidos.

Tabela 5 - Imagem do desgaste de flanco $V_{b\text{máx}}$

Lubrificação	Aresta Primária	Aresta Secundária
Seco		
Resfriamento		
MQL		
MQL + Resfriamento -		

Fonte: O autor (2024).

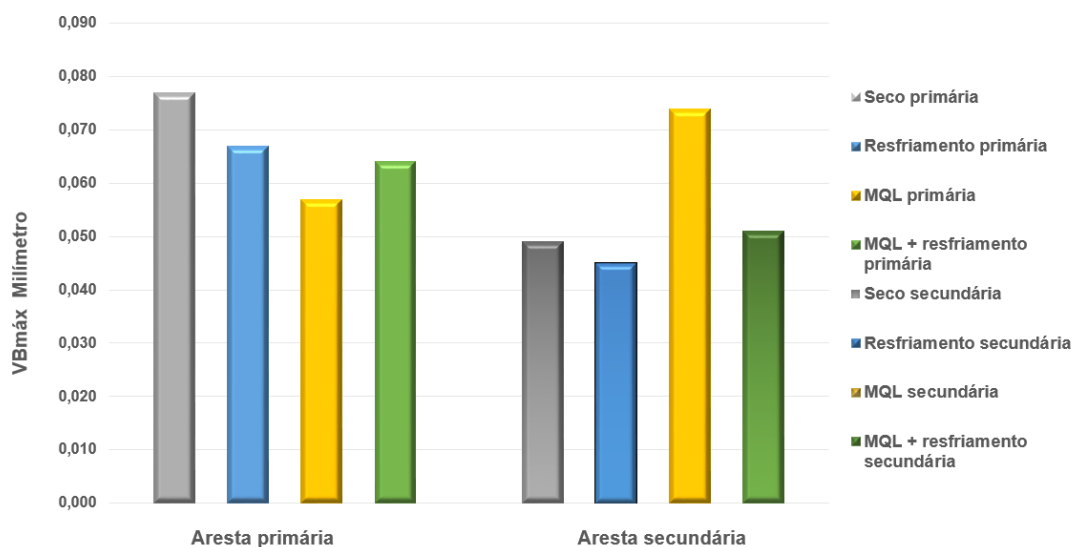
Tabela 6 - Análise de desgaste de flanco máximo $V_{b\text{máx}}$ da aresta primária e secundária

Experimento	Lubrificação	$V_{b\text{máx}}$ (mm) Primária	$V_{b\text{máx}}$ (mm) Secundária
1	Seco	0,077	0,049
2	Resfriamento	0,067	0,045
3	MQL	0,057	0,074
4	MQL + resfriamento	0,064	0,051

Fonte: O autor (2024).

O gráfico da figura 7 permite visualizar os valores de desgaste de flanco máximo na aresta primária e secundária para cada condição avaliada. Nesse caso foi considerado o inserto com o maior $V_{b\text{máx}}$ entre os dois insertos da ferramenta.

Figura 7 Desgaste $V_{b\text{máx}}$ da aresta primária e secundária



Fonte: O autor (2024).

Na aresta primária o melhor resultado ficou com o processo de MQL+resfriamento com o $V_{b\text{máx}}$ de 0,057 mm. Já na aresta secundária o melhor resultado ficou com o resfriamento com o $V_{b\text{máx}}$ de 0,045 mm.

O processo a seco teve o pior resultado na aresta primária dentre os métodos utilizados, devido ao calor gerado entre a interface ferramenta-peça e a ausência de refrigeração e lubrificação. Outro fator que pode explicar o maior valor de desgaste é a ausência do efeito de remoção do cavaco proporcionado pelos métodos de refrigeração, o que ocasiona a colisão da ferramenta com os cavacos acumulados ao seu redor. Esse resultado já era esperado, baseado em estudos realizados por outros autores.

O processo com uso do resfriamento obteve um desgaste da aresta primária um pouco menor se comparado com o seco. Já na aresta secundária foi bem eficaz o resfriamento, obtendo assim o menor desgaste dentre os métodos analisados. Conforme já era esperado teve uma melhora quanto a temperatura na interface ferramenta-peça.

Com o método de MQL na aresta primária teve um ótimo resultado, obtendo o menor desgaste de ferramenta. Já na aresta secundária não foi muito eficaz, ficando assim com o pior resultado. Diversos autores obtiveram resultados com relação ao uso do MQL, era esperado um bom resultado nas duas arestas.

A junção do MQL e resfriamento obteve um resultado melhor do que o processo a seco na



aresta primária. Na aresta secundária obteve um desgaste semelhante ao processo a seco.

Uma possível explicação sobre essa perda de eficiência é devido a alteração da viscosidade do fluido com o sistema de resfriamento, que dificultou a lubrificação na interface peça-ferramenta. Esta alteração na propriedade do fluido foi visível pela mudança de coloração ao entrar em contato com o ar gelado. Uma possibilidade futura é avaliar a utilização de diferentes fluidos ecológicos lubrificantes no MQL.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos estudos e testes realizados sobre a potência aparente, a rugosidade R_a obtida com cada método e os resultados de $V_{b\max}$, conclui-se que:

- O método a seco obteve o pior resultado quanto ao desgaste na aresta primária. Isto pode ser devido ao aquecimento na interface entre peça e ferramenta e por muitas vezes até colidindo com cavacos acumulados. Os cavacos gerados são de cor azulada, indicando uma temperatura elevada no processo de usinagem. Esse desgaste elevado causou uma rugosidade elevada na superfície usinada.
- O processo por resfriamento com ar gelado obteve o melhor resultado quanto ao consumo de potência, menor rugosidade e menor desgaste na aresta secundária. Estes resultados mostram a eficácia do sistema quanto ao resfriamento do processo, o que pode ser notada também pela coloração mais clara do cavaco gerado. Dessa forma este método se mostrou uma opção viável para a execução de um processo de usinagem sustentável.
- O processo com o MQL não obteve resultados satisfatórios, dessa forma, demanda novos estudos. Foi observado grande variação no desgaste em um dos insertos na aresta secundária. Contudo na aresta primária ocorreu um baixo desgaste, indicando uma eficiência na lubrificação e refrigeração durante o processo, o que pode ser confirmado pela coloração clara dos cavacos gerados.
- O método MQL + resfriamento também não proporcionou resultados satisfatórios nas condições avaliadas. Este procedimento também demanda estudos futuros. Foi possível observar que o sistema de resfriamento a ar gelado causou um efeito de alteração nas características do fluido lubrificante, que teve sua coloração e viscosidade visivelmente modificadas, o que pode ter prejudicado os resultados do método. Uma sugestão para trabalhos futuros é reavaliar a eficiência com aplicação de outros fluidos ecológicos e testar novo direcionamento das mangueiras dos sistemas de refrigeração e lubrificação.



REFERÊNCIAS

ABDELAOUI, Fatima Zohra El et al. Optimization techniques for energy efficiency in machining processes- a review. **The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology**. Fez, Morocco, p. 2967-3001. 2 fev. 2023. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-023-10927-y>. Acesso em: 28 ago. 2024.

ARRUDA, Étory Madrilles; BRANDÃO, Lincoln Cardoso. Performance study of multilayer carbide tool in high-speed turning of API 5L X70 pipeline steel using a cold air system. **The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology**. São João del Rei, Minas Gerais - Brazil, p. 85-103. jan. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0808-x>. Acesso em: 28 mar. 2024.

BENEDICTO, E.; CAROU, D.; RUBIO, E.M.. Technical, Economic and Environmental Review of the Lubrication/Cooling Systems Used in Machining Processes. **Procedia Engineering**. Spain, p. 99-116. mar. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.075>. Acesso em: 28 jul. 2024.

BOGATYREVA, I. V. et al. Estimation of the efficiency of working time usage as a factor of sustainable increase of labor productivity. **SHS Web of Conferences, Gdańsk – Nynäshamn**, Poland, v. 62, p. 1-5, 2019.

GHATGE, Dayanand; RAMANUJAM, R.. Sustainable machining: A review. **Materials Today: Proceedings**. Vellore, Índia, 09 ago. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.08.275>. Acesso em: 28 jul. 2024

GRUNER, Bruno D´Avila; SILVA, Cristiano da; CARLINI, Giovanni Conrado. Análise Do Fresamento Em Superfície Inclinada Com Ferramenta De Topo Esférica No Aço D6 Endurecido Sem Lubrificação. In: **Anais do Colóquio de Usinagem**. Anais...Curitiba(PR) PUCPR, 2022. Disponível em: <https://www.even3.com.br/anais/usinagem/480912-ANALISE-DO-FRESAMENTO-EM-SUPERFICIE-INCLINADA-COM-FERRAMENTA-DE-TOPO-ESFERICA-NO-ACO-D6-ENDURECIDO-SEM-LUBRIFICAC>. Acesso em: 28/07/2024

JOZIĆ, Sonja et al. Application of compressed cold air cooling: achieving multiple performance characteristics in end milling process. **Journal Of Cleaner Production**. Split, Croatia, p. 325-332. 1 ago. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.03.095>. Acesso em: 28 jul. 2024

KHANNA, Navneet; SHAH, Prassan; CHETAN. Comparative analysis of dry, flood, MQL and cryogenic CO2 techniques during the machining of 15-5-PH SS alloy. **Tribology International**. Índia, p. 0-0. maio 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106196>. Acesso em: 28 jul. 2024.

MODESTO, Danillo Lanzieri; JUNIOR, Joseph Youssif Saab; CEKINSKI, Efraim. Tubo De Vórtice De Ranque-Hilsch: Análise De Sua Evolução Histórica E De Modelos Numéricos Recentes. In: **Anais do I Web Encontro Nacional de Engenharia Química**. Anais...Diamantina(MG) online, 2021. Disponível em: <https://www.even3.com.br/anais/wendeq2021/345382-tubo-de-vortice-de-ranque-hilsch--analise-de-sua-evolucao-historica-e-de-modelos-numericos-recentes>. Acesso em: 28/07/2024

MOURA, Roque Antônio de et al. Projeto Mecânico Na Otimização De Processo Da Indústria Metalmeccânica Para Reduzir Tempo E Custo De Fabricação. **Revista de Administração - Unifatea**. São Paulo - Brasil, p. 82-90. jan. 2021. Disponível em: <http://131.196.144.12:8081/seer/index.php/raf/article/view/31/22>. Acesso em: 03 ago. 2024.

OLIVEIRA, Carlos Henrique et al. Influência Da Quantidade De Fluido De Corte No Fresamento De Topo Do Aço Inoxidável Duplex Uns S32205. **10º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**. São Carlos, São Paulo - Brasil, p. 0-0. 05 ago. 2019. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/335510064_influencia_da_quantidade_de_fluido_de_corte_no_fresamento_de_topo_do_aco_inoxidavel_duplex_uns_s32205. Acesso em: 29 jul. 2024.

PENILLAS, Juan M.; MARIANI, Néstor J.. Caracterización Macroscópica Del Funcionamiento De Un Tubo Vortex Para Distintos Fluidos De Trabajo. **7º Jornadas Itee - 2023**. La Plata, Argentina, p. 715-721. 25 abr. 2023. Disponível em: <https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/158027>. Acesso em: 28 jul. 2024.

PEREIRA, Joyce Mariana. O Licenciamento Ambiental: desafios na indústria de usinagem. **Dom Helder Revista de Direito**. Três Corações, Minas Gerais - Brasil, p. 1-22. 2 set. 2022. Disponível em: <https://revista.domhelder.edu.br/index.php/dhrevistadedireito/article/view/2327>. Acesso em: 03 ago. 2024.



QUEIROZ, Gustavo Rocha de; BRITO, Tarcísio Gonçalves de. Análise Da Rugosidade Ra E Do Desgaste De Ferramentas No Fresamento De Topo Do Aço Inoxidável Duplex Uns S32205. **V Simpósio de Iniciação Científica: Ciência, tecnologia e inovação no Brasil**. Ibirama, Santa Catarina - Brasil, p. 0-0. 20 dez. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.29327/1307153.1-103>. Acesso em: 29 ago. 2024.

RAVI, S. et al. A review and assessment of effect of cutting fluids. **Materials Today: Proceedings**. Tamilnadu, Índia, 28 fev. 2021. 2, p. 220-222. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.054>. Acesso em: 28 ago. 2024.

SALUR, Emin; KUNTOĞLU, Mustafa; ASLAN, Abdullah; PIMENOV, Danil Yurievich. The Effects of MQL and Dry Environments on Tool Wear, Cutting Temperature, and Power Consumption during End Milling of AISI 1040 **Steel**. *Metals*. Konya, Turkey, 16 set. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/met11111674>. Acesso em: 28 jul. 2024.

SHUKLA, Abhishek et al. Comparative study of dry machining with MQL assisted soybean oil in turning operation of AISI 304 steel. **Materials Today: Proceedings**. Lucknow, India, p. 0-0. 2 mar. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.02.228>. Acesso em: 03 ago. 2024.

SHUKLA, Adhip; KOTWANI, Aman; UNUNE, Deepak Rajendra. Performance comparison of dry, flood and vegetable oil based minimum quantity lubrication environments during CNC milling of Aluminium 6061. **Materials Today: Proceedings**. Jaipur, India, p. 1483-1488. 18 fev. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.11.060>. Acesso em: 28 jul. 2024.

ŞIRIN, Şenol; KdVAK, Turgay. Performances of different eco-friendly nanofluid lubricants in the milling of Inconel X-750 superalloy. **Tribology International**. Duzce, Turkey, p. 180-192. abr. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.04.042>. Acesso em: 28 jul. 2024.