

Estado da publicação: O preprint não foi publicado em outro meio.

Estratégias de Mitigação de Impactos Ambientais de Fluidos de Corte na Usinagem

Walter Pereira Bessa Neto, Jean Robert Pereira Rodrigues

<https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.14720>

Submetido em: 2025-12-26

Postado em: 2026-01-02 (versão 1)

(AAAA-MM-DD)

Estratégias de Mitigação de Impactos Ambientais de Fluidos de Corte na Usinagem

Environmental Impact Mitigation Strategies for Cutting Fluids in Machining

Walter Pereira Bessa Neto¹, walter.bessa@discente.ufma.br

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-3776-1928>

Jean Robert Pereira Rodrigues¹, jroberth@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3240-5232>

¹ Universidade Federal do Maranhão (UFMA) – Curso de Engenharia Mecânica
São Luís – MA, Brasil

Resumo: A utilização de fluidos de corte nos processos de usinagem é amplamente difundida devido aos benefícios relacionados à redução do atrito, ao controle da temperatura e ao aumento da vida útil das ferramentas. No entanto, o uso convencional desses fluidos está associado a impactos ambientais significativos, riscos à saúde ocupacional e elevados custos de tratamento e descarte. Neste contexto, o presente trabalho apresenta uma revisão bibliográfica narrativa sobre as principais estratégias adotadas para minimizar os impactos ambientais decorrentes da utilização de fluidos de corte. A metodologia baseou-se na análise crítica de artigos científicos, livros técnicos e normas pertinentes, abordando alternativas como o uso de fluidos biodegradáveis, a usinagem a seco e a técnica de Mínima Quantidade de Lubrificação (MQL). Os estudos analisados indicam que os fluidos biodegradáveis, especialmente à base de óleos vegetais, apresentam elevada biodegradabilidade e desempenho lubrificante adequado, enquanto a técnica MQL é reportada na literatura como capaz de promover ganhos na vida útil das ferramentas e reduzir significativamente o consumo de fluido. A usinagem a seco, por sua vez, destaca-se pela eliminação total de fluidos, embora possa apresentar limitações térmicas dependendo da operação. Conclui-se, com base na literatura revisada, que as estratégias analisadas contribuem para a sustentabilidade dos processos de usinagem, sendo a MQL e os fluidos biodegradáveis apontadas como alternativas promissoras, ao passo que novas pesquisas experimentais e análises de ciclo de vida são recomendadas.

Palavras-chave: Usinagem sustentável; fluidos de corte; MQL; usinagem a seco; impacto ambiental.

1. INTRODUÇÃO

Na atual conjuntura industrial, a busca por processos de produção mais sustentáveis e eficientes tem se intensificado, impulsionada pelas crescentes exigências ambientais e pela necessidade de mitigação dos impactos associados às atividades manufatureiras. No contexto da usinagem, os fluidos de corte são amplamente empregados com a finalidade de reduzir o atrito entre a ferramenta e a peça, controlar a temperatura do processo e prolongar a vida útil das ferramentas, além de contribuir para a melhoria da qualidade superficial dos componentes produzidos (Machado *et al.*, 2009). Apesar desses benefícios técnicos, a utilização convencional de fluidos de corte tem sido alvo de crescente preocupação devido aos impactos ambientais e aos riscos à saúde ocupacional que pode acarretar.

Os fluidos de corte tradicionais são, em sua maioria, derivados do petróleo e formulados com aditivos químicos que apresentam baixa biodegradabilidade e elevado potencial tóxico. A exposição contínua a esses compostos pode ocasionar problemas dermatológicos e respiratórios nos operadores, além de favorecer a contaminação de recursos hídricos, do solo e da atmosfera quando o descarte não é realizado de forma adequada (Barros *et al.*, 2017). Segundo Machado *et al.* (2015), esses impactos decorrem, principalmente, da composição química dos fluidos convencionais, o que reforça a necessidade de alternativas ambientalmente mais compatíveis para os processos de usinagem.

Diante desse cenário, diferentes estratégias vêm sendo investigadas com o objetivo de reduzir os impactos ambientais associados ao uso de fluidos de corte, sem comprometer a eficiência dos processos de usinagem. Entre essas estratégias, destacam-se o emprego de fluidos biodegradáveis, especialmente aqueles à base de óleos vegetais, a adoção da usinagem a seco e a aplicação da técnica de Mínima Quantidade de Lubrificação (Minimum Quantity Lubrication – MQL). Essas abordagens têm ganhado destaque por apresentarem potencial para reduzir a geração de resíduos, os riscos à saúde humana e os custos relacionados ao tratamento e descarte de fluidos, ao mesmo tempo em que mantêm níveis satisfatórios de desempenho operacional (Jawahir; Dillon, 2007).

Nesse contexto, o presente artigo tem como objetivo realizar uma revisão bibliográfica das principais medidas e práticas destinadas à mitigação dos impactos ambientais decorrentes da utilização de fluidos de corte em processos de usinagem. A revisão aborda, de forma crítica, os aspectos técnicos, ambientais e operacionais relacionados aos fluidos de corte convencionais, aos fluidos biodegradáveis, à usinagem a seco e à técnica MQL, destacando seus benefícios, limitações e potencial de aplicação industrial. Com isso, busca-se contribuir para o avanço do conhecimento na área de usinagem sustentável, promovendo o equilíbrio entre eficiência produtiva e responsabilidade ambiental.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho caracteriza-se como uma revisão bibliográfica de natureza narrativa, cujo objetivo é analisar estratégias destinadas à mitigação dos impactos ambientais associados ao uso de fluidos de corte em processos de usinagem.

A revisão foi construída com base em aproximadamente 87 publicações, incluindo artigos científicos, teses e dissertações, livros técnicos, normas e documentos institucionais relacionados ao tema. Dentre esse conjunto, cerca de 44 estudos (artigos em periódicos científicos e trabalhos acadêmicos com conteúdo experimental ou técnico) compuseram o corpus principal de análise qualitativa, por apresentarem discussões diretamente relacionadas a fluidos de corte, alternativas biodegradáveis, usinagem a seco e à técnica de Mínima Quantidade de Lubrificação (MQL).

As demais referências foram utilizadas como suporte conceitual, normativo e contextual, contribuindo para a fundamentação teórica e a contextualização ambiental e tecnológica do tema. A seleção dos estudos priorizou trabalhos que abordassem parâmetros considerados críticos para a sustentabilidade dos processos de usinagem, tais como vida útil das ferramentas, comportamento térmico, desempenho tribológico e impactos ambientais.

Por tratar-se de uma revisão narrativa, reconhece-se a existência de viés de seleção inerente a esse tipo de abordagem. No entanto, buscou-se mitigar esse efeito por meio da utilização de múltiplas fontes de dados e da análise crítica dos estudos selecionados.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Fluidos biodegradáveis

A aplicação de fluidos de corte convencionais tem gerado vários problemas ambientais, como a poluição, decorrente da dissociação química desses fluidos quando expostos a elevadas temperaturas; problemas biológicos para os operadores, poluição da água e contaminação do solo durante o descarte. Diante desses problemas, a substituição de lubrificantes convencionais por produtos ecologicamente corretos na indústria de processos de usinagem é a necessidade deste século. Sendo assim, para superar estes diversos desafios, muitos fluidos de corte biodegradáveis estão sendo explorados, feitos de forma natural e sintética (LAWAL; CHOUDHURY; NUKMAN, 2012; CHETAN; GOSH; RAO, 2015).

De maneira geral, os óleos vegetais (naturais) são ecológicos, renováveis, altamente biodegradáveis e não apresentam toxicidade por natureza, sendo considerados candidatos potenciais a substituir os fluidos de corte a base de petróleo. Em contrapartida, os ésteres sintéticos são os óleos vegetais modificados quimicamente, tendo um alto nível de estabilidade e resistência a corrosão, além de possuírem boa biodegradabilidade e atributos toxicológicos (DEBNATH; REDDY; YI, 2014; SINIAWSKI et al., 2007; WEINERT et al., 2004; CHETAN; GOSH; RAO, 2015).

3.1.1 Viscosidade

Os óleos vegetais, por exemplo, têm a eficácia de operar satisfatoriamente como lubrificante na usinagem, ao mesmo tempo em que eliminam as preocupações ambientais e de saúde. Conforme evidenciado na Figura 1, o óleo vegetal derivado da palma, classificado na literatura como um dos fluidos recomendados para trabalhos em metais, apresenta uma viscosidade mais elevada em comparação com o óleo mineral em diversas faixas de temperatura (CORDEIRO, 2020). Essa alta viscosidade do óleo vegetal revela-se altamente vantajosa para a indústria metalúrgica, proporcionando uma lubrificação mais consistente ao longo do intervalo de temperatura abordado. Nas operações de usinagem, onde o atrito metal-metal gera calor específico, trabalha-se em condições de temperaturas elevadas, por isso, a escolha preferencial recai sobre a utilização de óleos lubrificantes com maior viscosidade.

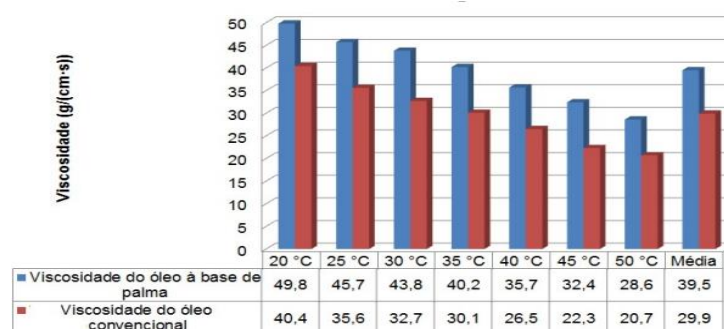


Figura 1 – Comparação da viscosidade com variação de temperatura em fluidos de corte.
Fonte: Cordeiro (2020).

Conforme indica a Figura 2, para além do óleo derivado da palma, diversos outros óleos vegetais, tais como o de colza, girassol e soja, apresentam uma viscosidade superior ao óleo convencional. Esses óleos apresentam propriedades notáveis que os tornam adequados para serem usados como fluidos em processos metalúrgicos, especialmente quando comparados ao óleo mineral sob as mesmas condições térmicas.

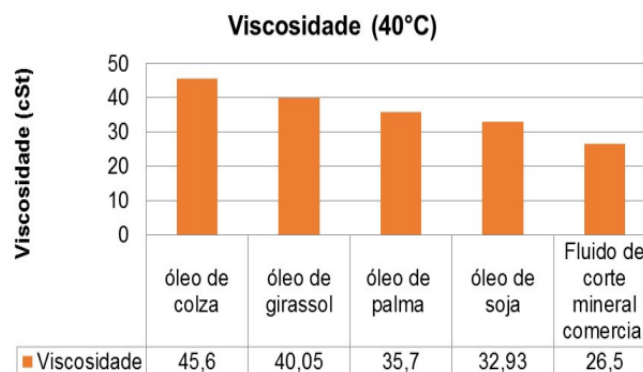


Figura 2 - Viscosidade em diferentes óleos vegetais e mineral.
Fonte: Cordeiro (2020).

3.1.2 Biodegradabilidade

Conforme apontado por Sil (2017), a avaliação da biodegradabilidade de um transporte ocorre pela quantidade do produto que naturalmente se converte em dióxido de carbono quando exposto a agentes biológicos ao longo de um período específico.

Existem diferenças na suscetibilidade à manipulação microbiana entre diferentes estruturas químicas. Notavelmente, óleos vegetais e ésteres sintéticos são exemplos. De maneira geral, essas categorias de óleos tendem a se biodegradar mais rapidamente do que os óleos minerais em condições similares (SIL, 2017) como indica a Tabela 1.

Tabela 1 - **Taxas de biodegradação para diferentes óleos lubrificantes básicos.**

Óleo Lubrificante Básico	Fonte do Óleo Básico	Biodegradação
Óleo Mineral	Petróleo	Lentamente
Óleos Vegetais	Óleos Vegetais naturais	Facilmente

Fonte: Adaptado de MANNEKOTE *et al.* 2018.

Na Tabela 1, os lubrificantes derivados de óleos vegetais apresentam uma maior biodegradabilidade em comparação aos lubrificantes minerais. Essa disparidade pode ser atribuída à composição química específica dos biolubrificantes, que possuem cadeias moleculares mais curtas. Além disso, a presença de grupos éster na estrutura molecular permite a hidrólise e a vulnerabilidade da ligação dupla na cadeia do grupo éster a ataques espontâneos de micro-organismos. Esse resultado resulta em uma maior oxidação e, portanto, em uma biodegradação mais intensa. A estrutura química da matéria orgânica, conforme indicado na Figura 3, é o fator preponderante na definição da biodegradabilidade dos fluidos de corte (CORDEIRO, 2020).

De acordo com os resultados do teste CEC-L-33-T-82 da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) (SHARMA; BIRESAW, 2016), observa-se que o financiamento à base de óleo vegetal registra aproximadamente 90% de seu volume total degradado pelo ambiente em cerca de 21 dias, enquanto o óleo mineral atinge apenas 20%. Esses dados indicam que os óleos vegetais são notavelmente mais suscetíveis à permanência por ação de agentes biológicos, sendo degradados aproximadamente quatro vezes mais rapidamente que os óleos minerais nas mesmas condições, como observado na Figura 3 (CORDEIRO, 2020).

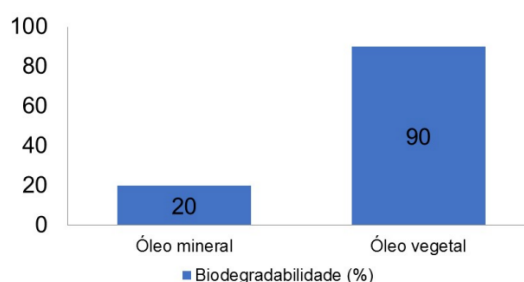


Figura 3 - **Percentual de biodegradabilidade do óleo convencional e biolubrificante.**

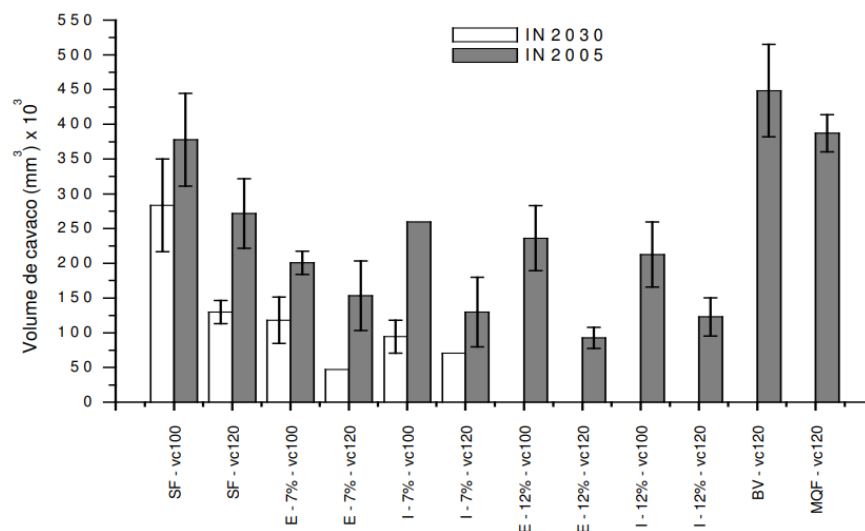
Fonte: Cordeiro (2020).

É conhecido que a biodegradabilidade surge a partir da desintegração de substâncias por microrganismos, resultando em produtos não tóxicos, como dióxido de carbono e água. A eficácia de que os microrganismos realizam esse processo depende da estrutura química, com ênfase especial na extensão da ramificação da cadeia.

3.2 Usinagem a seco

Teixeira (2006) conduziu uma pesquisa que exhibe os resultados da vida útil da ferramenta durante operações de fresamento para todas as condições testadas na fase de acabamento, conforme indica a Figura 4. Observa-se que a ferramenta feita de metal duro da classe M20-M40 (IN2005), com revestimento de TiAlN por meio do processo PVD, apresenta um desempenho superior em comparação com a ferramenta M30-M40 (IN2030), também com o mesmo revestimento, em todas as condições em que a comparação é possível, pois possibilita a remoção de uma quantidade maior de cavaco ao longo da vida da ferramenta.

Material fresado: aço inoxidável 15-5PH (UNS 15500), dureza 35 HRC. **Ferramentas:** Metal duro classe M30-M40 (IN2030), PVD TiAlN e M20-M40 (IN2005), PVD TiAlN. **Inserto:** APKT080304R. **Parâmetros de corte:** $a_p=1,0$ mm; $a_e=13,3$ mm; $f_z=0,08(0,04)$ mm/inserto. Para $v_c=100$ m/min: $v_f=401(200)$ mm/min, $n=1670$ rpm. Para $v_c=120$ m/min: $v_f=481(240)$ mm/min, $n=2005$ rpm. **Fluidos de corte:** base vegetal (Blaser Vasco 1000), concentração 7% e 12%; base vegetal, integral, (Vascomill MKS42) em baixa vazão e MQF. **Aplicação:** externa e interna.



Legenda:
SF – sem fluido de corte
vc100 – velocidade de corte de 100 m/min (vazão 45 l/min)
vc120 – velocidade de corte de 120 m/min (vazão 22,5 l/min)
E – Aplicação externa de fluido de corte(emulsão)
I – Aplicação interna de fluido de corte(emulsão)
7% – concentração 7%
12% – concentração 12%
BV – baixa vazão (250 ml/min), aplicação externa.
MQF – Mínima Quantidade de Fluido, vazão 35 ml/h.

Figura 4 - Resultados relativos à vida da ferramenta em termos de volume de cavaco removido para todas condições ensaiadas em operação de acabamento.

Fonte: Teixeira (2006).

No caso do metal duro da classe M30-M40 (IN2030), é evidente que a condição sem a presença de fluido de corte apresentou um desempenho superior nas duas velocidades de corte empregadas, removendo assim, um volume de cavaco maior, quando comparada tanto à aplicação de emulsão, interna e externamente à ferramenta. Na condição sem fluido de corte, a uma velocidade de corte de 100 m/min, o volume de cavaco usinado é consideravelmente maior do que nas condições em que a emulsão foi utilizada, independentemente da concentração e do modo de aplicação. Esse volume é

três vezes superior à condição com emulsão aplicada internamente. Em relação ao tempo de corte, enquanto na condição sem fluido de corte o tempo foi de 56,4 minutos, na condição com fluido e aplicação interna o tempo de corte foi de 18,8 minutos. Na condição sem fluido de corte, a ferramenta é exposta a variações de temperatura menores em comparação com a aplicação do fluido, conforme indica a Figura 5 (TEIXEIRA, 2006).

Material fresado: aço inoxidável 15-5PH (UNS 15500), dureza 35 HRC. **Ferramenta:** Metal duro classe M30-M40 (IN2030), PVD TiAlN. **Inserto:** APKT080304R. **Parâmetros de corte:** $v_c=100$ m/min; $a_p=1,0$ mm; $a_e=13,3$ mm; $v_f=401(200)$ mm/min; $f_z=0,08(0,04)$ mm/inserto; $n=1670$ rpm. **Fluido de corte:** Blaser Vasco 1000, concentração 7%. **Aplicação:** externa (vazão 45 l/min); interna (vazão 22,5 l/min)

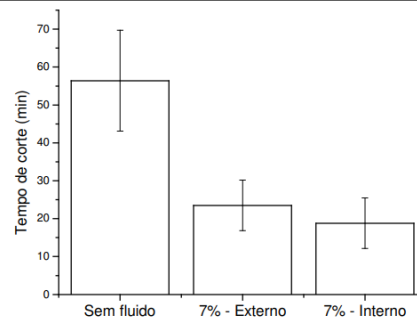


Figura 5 - Resultados dos ensaios de acabamento com velocidade de corte de 100 m/min e material da ferramenta IN2030 em termos de tempo de corte.

Fonte: Teixeira (2006).

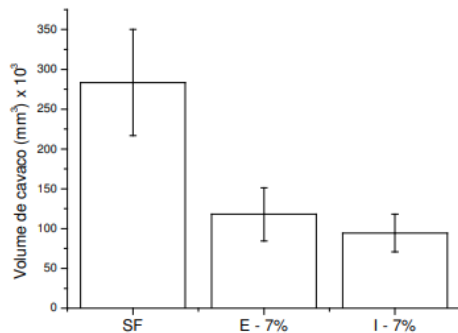
O acréscimo na velocidade de corte resulta em uma redução no volume de cavaco usinado em cada condição testada, devido ao aumento da temperatura na região de corte. O incremento de temperatura contribui para a diminuição da vida da ferramenta, pois intensifica o desgaste, levando a uma retirada menor de cavaco até atingir o limite predefinido de desgaste de flanco ($V_{bb\ max}$), estabelecido em 0,2 mm na operação de acabamento. O impacto desse aumento de temperatura torna-se especialmente prejudicial à vida da ferramenta, principalmente nas condições em que há a aplicação de fluido emulsionável. Nessas circunstâncias, devido à capacidade da água de dissipar calor na região de corte, a ferramenta fica sujeita a elevados gradientes de temperatura, resultando em microtrincas de origem térmica que aceleram significativamente o desgaste da ferramenta (TEIXEIRA, 2006).

No caso da ferramenta de metal duro M20-M40 (IN2005), observou-se o mesmo padrão tanto para a velocidade de 100 m/min quanto para a velocidade de 120 m/min, ao comparar a condição sem fluido de corte com aquelas em que a emulsão é aplicada interna ou externamente, seja com uma concentração de 7% ou 12%. Em todas essas situações, a condição sem fluido de corte consistentemente permitiu uma remoção significativamente maior de volume de cavaco.

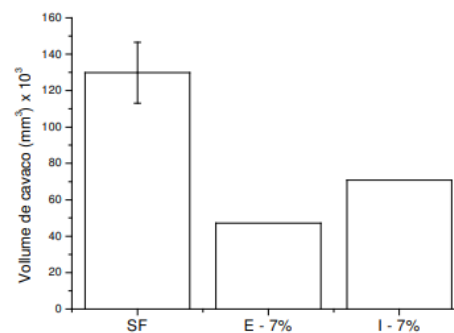
No que diz respeito às situações em que o fluido de corte emulsionável foi utilizado, é possível realizar algumas ponderações. Com esse propósito, os dados representados na Figura 4 foram rearranjados e estão agora exemplificados na Figura 6. Conforme evidenciado pela Figura 6, é perceptível que a adoção do fluido de corte emulsionável resulta em uma significativa redução na vida útil da ferramenta e, por conseguinte, na quantidade de cavaco removido durante o processo de fresamento. Este

efeito é constatado em diferentes velocidades de corte testadas. Ao aumentar a velocidade de corte, nota-se que esse aumento provoca um acréscimo na temperatura na zona de corte e na aresta da ferramenta. A utilização do fluido gera gradientes térmicos mais elevados em comparação à condição com uma velocidade de corte de 100 m/min, resultando em uma considerável diminuição na vida útil da ferramenta.

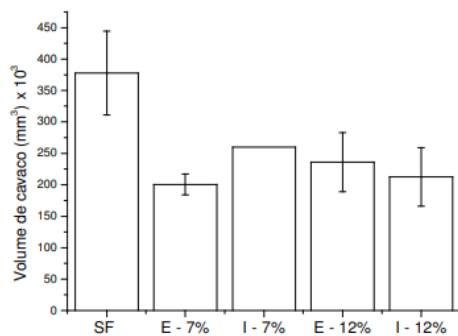
Material fresado: aço inoxidável 15-5PH (UNS 15500), dureza 35 HRC. **Operação:** acabamento. **Ferramentas:** Metal duro classe M30-M40 (IN2030), PVD TiAlN e M20-M40 (IN2005), PVD TiAlN. **Inserto:** APKT080304R. **Parâmetros de corte:** $a_p=1,0$ mm; $a_e=13,3$ mm; $f_z=0,08(0,04)$ mm/inserto. Para $v_c=100$ m/min: $v_f=401(200)$ mm/min e $n=1670$ rpm. Para $v_c=120$ m/min: $v_f=481(240)$ mm/min e $n=2005$ rpm. **Fluidos de corte:** base vegetal (Blaser Vasco 1000), concentração 7% e 12%; vegetal, integral, (Vascomill MKS42) em baixa vazão e MQF. **Aplicação:** externa e interna.



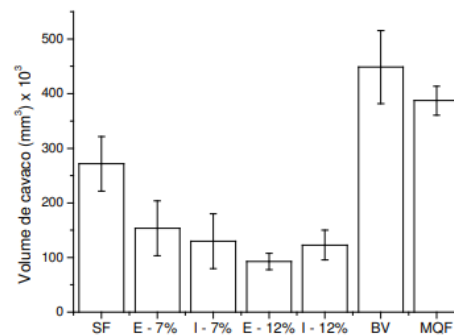
a) Ferramenta IN2030, $v_c = 100$ m/min.



b) Ferramenta IN2030, $v_c = 120$ m/min.



c) Ferramenta IN2005, $v_c = 100$ m/min.



d) Ferramenta IN2005, $v_c = 120$ m/min.

Legenda:

SF – sem fluido de corte

E – Aplicação externa de fluido de corte (vazão 45 l/min), emulsão

I – Aplicação interna de fluido de corte (vazão 22,5 l/min), emulsão

7% – concentração 7%

12% – concentração 12%

BV – baixa vazão (250 ml/min), aplicação externa, integral.

MQF – Mínima Quantidade de Fluido, vazão 35 ml/h, integral.

Figura 6 - Resultados dos ensaios de acabamento para ferramenta IN2030 com velocidades de corte de 100 m/min (a) e 120 m/min (b) e para ferramenta IN2005 com velocidades de corte de 100 m/min (c) e 120 m/min (d).

Fonte: Teixeira (2006).

Os resultados indicam que o principal fator de influência na vida útil da ferramenta é a presença ou ausência do fluido de corte. Isso se deve ao efeito da considerável variação de temperatura na ferramenta a cada rotação, o que se revela prejudicial quando o fluido de corte está em uso. Em outras palavras, conclui-se que, em processos de fresamento semelhantes aos testados neste estudo, a refrigeração se mostra prejudicial à ferramenta, independentemente da aplicação interna ou externa do fluido e da concentração utilizada.

3.3 Usinagem com MQL

Um corpo de pesquisa associado à Universidade de Caxias do Sul, o Grupo de Usinagem (GUS), concentra seus estudos em uma linha dedicada a essa temática. Ao conduzir inúmeros experimentos, o grupo obteve resultados favoráveis ao emprego da técnica MQL (Mínima Quantidade de Lubrificante). A seguir, destacam-se alguns desses resultados, evidenciando a eficácia da abordagem na promoção da responsabilidade ambiental nos processos de usinagem, através do substancial redução no consumo de fluidos de corte (ZEILMANN; VACARO, 2009).

Experimentos envolvendo o fresamento foram realizados utilizando ferramentas de aço-rápido (HSS) com 6 mm de diâmetro e revestimento de nitreto de titânio (TiN), sendo aplicadas no processo de usinagem de aço endurecido. Os resultados indicaram tempos de vida que chegaram a ser 100% superiores quando a técnica MQL foi empregada em comparação com o uso de emulsão, conforme evidenciado na Figura 7.

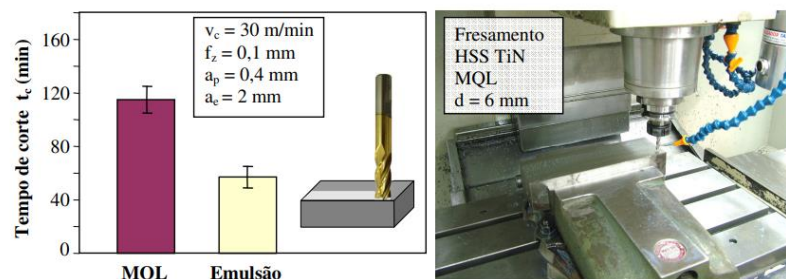


Figura 7 - **Resultados de ensaio de fresamento.**

Fonte: Zeilmann e Vacaro (2009).

O fresamento é um procedimento de usinagem que se destaca pelo caráter de corte interrompido, resultando em variações cíclicas das cargas térmicas e mecânicas na borda de corte. A aplicação de fluidos lubrificantes-refrigerantes intensifica o gradiente de temperatura na borda de corte, propiciando o surgimento de trincas térmicas, as quais aceleram o desgaste da ferramenta. Ao adotar a MQL, também há um aumento no gradiente de temperatura, embora de maneira mais moderada em comparação com a emulsão. Este comportamento é amplamente conhecido em ferramentas de metal-duro, geralmente mais suscetíveis a variações abruptas de temperatura, enquanto as ferramentas de aço-rápido tendem a suportar melhor tais oscilações. No entanto, os resultados obtidos indicam que, mesmo para ferramentas de aço-rápido, a redução na variação de temperatura, aliada à microlubrificação proporcionada pela condição MQL, pode resultar em menor desgaste das ferramentas.

Zeilmann e Vacaro (2009) também conduziram experimentos utilizando brocas de aço-rápido com diâmetro de 8 mm, desprovidas de qualquer revestimento em ensaios de furação. As conclusões extraídas dos resultados indicaram uma extensão nos tempos de vida sob a condição de MQL. A Figura 8 apresenta os resultados dos ensaios de furação.

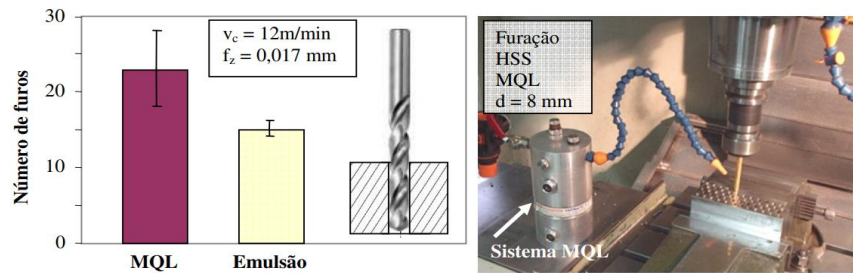


Figura 8 - Resultados de ensaio de furação com brocas de aço-rápido

Fonte: Zeilmann e Vacaro (2009).

O resultado positivo observado na condição de MQL é atribuível à interação complexa entre os efeitos térmicos e mecânicos durante o processo de usinagem. Apesar da ausência de uma refrigeração abundante na zona de corte, a elevação controlada da temperatura do material a ser usinado desempenha um papel benéfico. Isso ocorre devido à redução da resistência ao cisalhamento do metal, o que, por sua vez, resulta em menores esforços mecânicos exigidos para o corte. Na condição de MQL, a lubrificação mínima demonstrou ser suficiente para mitigar o atrito, diminuindo a carga térmica sobre a ferramenta. Esse cenário contrasta com a condição de emulsão, onde o uso abundante do fluido impede uma elevação significativa da temperatura da peça, mantendo a resistência ao cisalhamento do material em níveis elevados.

4. CONCLUSÕES

Com base no estudo das estratégias abordadas, que incluem o uso de fluidos biodegradáveis, a usinagem a seco e a aplicação da técnica MQL, visando mitigar os impactos ambientais associados à utilização convencional de fluidos de corte nos processos de usinagem, pode-se concluir:

- O óleo vegetal derivado da palma apresentou uma viscosidade superior à do óleo mineral em diversas faixas de temperatura. Essa elevada viscosidade do óleo vegetal revelou-se altamente vantajosa para a indústria metalúrgica, proporcionando uma lubrificação mais consistente ao longo do intervalo de temperatura considerado. Nas operações de usinagem, onde o atrito metal-metal gera calor específico, trabalha-se em condições de temperaturas elevadas, portanto, é preferível utilizar óleos lubrificantes com maior viscosidade.
- Os resultados apontam que o fator preponderante para a vida útil da ferramenta é a presença ou ausência de emulsão. Isso ocorre devido ao impacto da considerável variação de temperatura na ferramenta durante cada rotação, o que se revela prejudicial quando o fluido de corte está em operação. Em resumo, podemos inferir que, em processos de fresamento similares aos examinados neste estudo, a refrigeração apresenta efeitos adversos sobre a ferramenta, independentemente da aplicação interna ou externa do fluido e da concentração utilizada.

- Ao adotar a MQL, também houve um aumento no gradiente de temperatura, embora de forma moderada em comparação com a emulsão na usinagem por fresamento. Para ferramentas de aço-rápido, a redução na variação de temperatura aliada à microlubrificação proporcionada pela condição MQL, resultou em um menor desgaste das ferramentas.
- No processo de furação, o resultado positivo observado na condição de MQL em comparação com aplicação de fluido de corte por emulsão é atribuível a elevação controlada da temperatura do material a ser usinado que reduziu significativamente a resistência ao cisalhamento do metal, o que, por sua vez, resultou em menores esforços mecânicos exigidos para o corte, aumentando assim, a vida útil da ferramenta. Esse cenário contrasta com a condição de emulsão, onde o uso abundante do fluido impediu uma elevação significativa da temperatura da peça, mantendo a resistência ao cisalhamento do material em níveis elevados, proporcionando um maior desgaste.

Nesse contexto, a promoção de práticas mais sustentáveis na usinagem, aliada à adoção responsável de tecnologias e técnicas inovadoras, emerge como um componente primordial para equilibrar a eficiência operacional com a preservação ambiental e a saúde dos operadores. O estudo proposto contribui para o entendimento dessas questões e destaca a necessidade contínua de avançar em direção a uma usinagem mais consciente e responsável.

5. CONTRIBUIÇÃO DE AUTORIA

- **Walter Pereira Bessa Neto:** Conceptualização, Metodologia, Investigação, Análise formal, Curadoria de dados, Visualização, Escrita – redação original.
- **Jean Robert Pereira Rodrigues:** Supervisão, Metodologia, Validação, Escrita – revisão e edição.

6. DECLARAÇÃO DE DISPONIBILIDADE DE DADOS

Os dados que suportam os achados deste estudo estão contidos no próprio manuscrito.

7. CONFLITO DE INTERESSES

Os autores declaram que não possuem conflitos de interesses de natureza financeira, comercial ou pessoal que possam ter influenciado os resultados ou a interpretação dos dados apresentados neste trabalho.

8. REFERÊNCIAS

ABELE, E.; DÖRR, J. Ferramentas de corte protegidas contra a defasagem tecnológica. *Máquinas e Metais*, n. 439, p. 38–53, 2002.

ALMEIDA, D. O.; NAVES, V. T. G.; MACHADO, A. R.; BACCI, M. da S. Influência da direção de aplicação do fluido de corte na temperatura da interface cavaco-ferramenta. In: **Congresso Brasileiro Científico de Comunicação Organizacional e de Relações Públicas – ABRAPCORP**, 4., 2011.

ALMOND, E. A. Towards improved tests based on fundamental properties. In: **Proceedings of the International Conference on Towards Improved Performance of Tool Materials**. The National Physical Laboratory, 1981.

ALUYOR, E. O.; KESSINGTON, O. O.; MUDIACHEOGHENE, E. Biodegradation of vegetable oils: a review. *Scientific Research and Essay*, v. 4, n. 6, p. 543–548, 2009.

ALVES, M. C. S. *Análise da influência da velocidade de mergulho na retificação de aços endurecidos utilizando refrigeração otimizada*. 2005. 167 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) – Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2005.

ATTANASIO, A. et al. Minimal quantity lubrication in turning: effect on tool wear. *Wear*, v. 260, n. 3, p. 333–338, 2006.

AVALLONE, E. A.; BAUMEISTER III, T.; SADEGH, A. *Marks' Standard Handbook for Mechanical Engineers*. New York: McGraw-Hill, 1987.

BALL, A. A survey of metalworking fluid mist in manufacturing plants. *Lubrication Engineering*, v. 53, n. 9, p. 18–22, 1997.

BARROS, A. J.; NIZA, E. M.; RIGO, J. S.; SILVA, L. H. D.; CASTRO, M. D. G. Gestão de resíduos de usinagem: proposta viável para mitigação ambiental. *Integrada – Revista Científica da FACOL/ISEOL*, v. 4, 2017.

BATALLER, H. et al. Cutting fluid emulsions produced by dilution of a cutting fluid concentrate containing a cationic/nonionic surfactant mixture. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 152, p. 215–220, 2004.

BENNETT, E. *Dermatitis in machinists: causes and solutions*. Angleton: Biotech Publishing, 1993.

BERG, H. V. D. et al. A importância da escolha do revestimento e do projeto da ferramenta. *Máquinas e Metais*, p. 28–37, 2002.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. *Diário Oficial da União*, Brasília, 18 mar. 2005.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 401, de 4 de novembro de 2008. *Diário Oficial da União*, Brasília, 5 nov. 2008.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. *Diário Oficial da União*, Brasília, 3 ago. 2010.

CAMPOS JÚNIOR, W. M. Cromo e alumínio: o grande salto na usinagem verde e HSC. *Máquinas e Metais*, v. 475, p. 90–105, 2005.

CARRETEIRO, R. P.; BELMIRO, P. N. A. *Lubrificantes e lubrificação industrial*. Rio de Janeiro: Interciência, 2006.

CHETAN; GHOSH, S.; RAO, P. V. Application of sustainable techniques in metal cutting for enhanced machinability: a review. *Journal of Cleaner Production*, v. 100, p. 17–34, 2015.

CHILDS, T. H. C.; MAEKAWA, K.; MAULIK, P. Effects of coolant on temperature distribution in metal machining. *Materials Science and Technology*, v. 4, n. 11, p. 1006–1019, 1988.

DEBNATH, S.; REDDY, M. M.; YI, Q. S. Environmental friendly cutting fluids and cooling techniques in machining: a review. *Journal of Cleaner Production*, v. 83, p. 33–47, 2014.

DHAR, N. R.; KAMRUZZAMAN, M.; AHMED, M. Effect of minimum quantity lubrication on tool wear and surface roughness in turning AISI 4340 steel. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 172, n. 2, p. 299–304, 2006.

DIAS, A. M. *Avaliação ambiental de fluidos de corte utilizados em processos convencionais de usinagem*. Dissertação (Mestrado) – UFSC, 2000.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. *Tecnologia da usinagem dos materiais*. São Paulo: Artliber, 2000.

DUNLAP, C. Should you try dry? *Cutting Tool Engineering*, v. 49, n. 1, p. 22–33, 1997.

HADAD, M.; SADEGHI, B. Minimum quantity lubrication turning of AISI 4140 steel alloy. *Journal of Cleaner Production*, v. 54, p. 332–343, 2013.

HANDBOOK ASM. *Machining*. ASM International, v. 16, 2017.

JAWAHIR, I. S.; DILLON JR., O. W. Sustainable manufacturing processes. In: **International Conference on Sustainable Manufacturing**, 2007.

KLOCKE, F.; EISENBLÄTTER, G. Dry cutting. *CIRP Annals*, v. 46, n. 2, p. 519–526, 1997.

LAWAL, S. A.; CHOUDHURY, I. A.; NUKMAN, Y. A critical assessment of lubrication techniques in machining processes. *Journal of Cleaner Production*, 2012.

MACHADO, A. R. et al. *Teoria da usinagem dos materiais*. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2015.

MANNEKOTE, J. K. et al. Environmentally friendly functional fluids from renewable and sustainable sources. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 81, p. 1787–1801, 2018.

SREEJITH, P. S.; NGOI, B. K. A. Dry machining: machining of the future. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 101, p. 287–291, 2000.

TEIXEIRA FILHO, F. *A utilização de fluido de corte no fresamento do aço inoxidável 15-5PH*. Tese (Doutorado) – UNICAMP, 2006.

WEINERT, K. et al. Dry machining and minimum quantity lubrication. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, v. 53, p. 511–537, 2004.

ZEILMANN, R. P.; VACARO, T. Processos de usinagem e responsabilidade ambiental através da redução da utilização de fluidos de corte. Disponível em: <https://siambiental.ucs.br>. Acesso em: 10 dez. 2023.

9. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Environmental Impact Mitigation Strategies for Cutting Fluids in Machining

Walter Pereira Bessa Neto¹, walter.bessa@discente.ufma.br

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-3776-1928>

Jean Robert Pereira Rodrigues¹, jroberth@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3240-5232>

¹ Universidade Federal do Maranhão (UFMA) – Curso de Engenharia Mecânica
São Luís – MA, Brasil

Abstract: The use of cutting fluids in machining processes is widely adopted due to their benefits related to friction reduction, temperature control, and extended tool life. However, the conventional use of these fluids is associated with significant environmental

impacts, occupational health risks, and high costs related to treatment and disposal. In this context, this study presents a narrative literature review addressing the main strategies adopted to mitigate the environmental impacts resulting from the use of cutting fluids in machining processes. The methodology was based on the critical analysis of scientific articles, technical books, and relevant standards, covering alternatives such as biodegradable cutting fluids, dry machining, and the Minimum Quantity Lubrication (MQL) technique. The reviewed studies indicate that biodegradable cutting fluids, especially those based on vegetable oils, exhibit high biodegradability and adequate lubricating performance, while the MQL technique is reported in the literature to provide significant improvements in tool life and a substantial reduction in fluid consumption. Dry machining, in turn, stands out for the complete elimination of cutting fluids, although it may present thermal limitations depending on the machining operation. Based on the literature reviewed, it is concluded that the analyzed strategies contribute to the sustainability of machining processes, with MQL and biodegradable cutting fluids being identified as promising alternatives. Nevertheless, further experimental studies and life cycle assessments are recommended to deepen the evaluation of these technologies.

Keywords:

Sustainable machining; Cutting fluids; MQL; Dry machining; Environmental impact.

Este preprint foi submetido sob as seguintes condições:

- Os autores declaram que os necessários Termos de Consentimento Livre e Esclarecido de participantes ou pacientes na pesquisa foram obtidos e estão descritos no manuscrito, quando aplicável.
- Os autores declaram que a elaboração do manuscrito seguiu as normas éticas de comunicação científica.
- Os autores declaram que estão cientes que são os únicos responsáveis pelo conteúdo do preprint e que o depósito no SciELO Preprints não significa nenhum compromisso de parte do SciELO, exceto sua preservação e disseminação.
- Os autores declaram que os dados, aplicativos e outros conteúdos subjacentes ao manuscrito estão referenciados.
- O manuscrito depositado está no formato PDF.
- Os autores declaram que a pesquisa que deu origem ao manuscrito seguiu as boas práticas éticas e que as necessárias aprovações de comitês de ética de pesquisa, quando aplicável, estão descritas no manuscrito.
- Os autores declaram que uma vez que um manuscrito é postado no servidor SciELO Preprints, o mesmo só poderá ser retirado mediante pedido à Secretaria Editorial do SciELO Preprints, que afixará um aviso de retratação no seu lugar.
- Os autores concordam que o manuscrito aprovado será disponibilizado sob licença [Creative Commons CC-BY](#).
- O autor submissor declara que as contribuições de todos os autores e declaração de conflito de interesses estão incluídas de maneira explícita e em seções específicas do manuscrito.
- Os autores declaram que o manuscrito não foi depositado e/ou disponibilizado previamente em outro servidor de preprints ou publicado em um periódico.
- Caso o manuscrito esteja em processo de avaliação ou sendo preparado para publicação mas ainda não publicado por um periódico, os autores declaram que receberam autorização do periódico para realizar este depósito.
- O autor submissor declara que todos os autores do manuscrito concordam com a submissão ao SciELO Preprints.