

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

RONI HAMILTON VIEIRA GONÇALVES JUNIOR

**FRESAMENTO DA LIGA DE ALUMÍNIO 6011 UTILIZANDO FLUIDO DE CORTE
VEGETAL DE MORINGA OLEÍFERA**

LONDRINA

2024

RONI HAMILTON VIEIRA GONÇALVES JUNIOR

**FRESAMENTO DA LIGA DE ALUMÍNIO 6011 UTILIZANDO FLUIDO DE CORTE
VEGETAL DE MORINGA OLEÍFERA**

Milling of aluminum alloy 6011 using moringa oleífera vegetable cutting fluid

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientadora: Profa. Dra. Janaina Fracaro de Souza Gonçalves

LONDRINA

2024



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

RONI HAMILTON VIEIRA GONÇALVES JUNIOR

**FRESAMENTO DA LIGA DE ALUMÍNIO 6011 UTILIZANDO FLUIDO DE CORTE
VEGETAL DE MORINGA OLEÍFERA**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 23/Agosto/2024.

Janaina Fracaro de Souza Gonçalves
Doutora em Engenharia Aeronáutica e Mecânica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Roger Nabeyama Michels
Doutorado em Agronomia
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Amadeu Lombardi Neto
Doutorado em Engenharia Metalúrgica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

LONDRINA

2024

Dedico este trabalho aqueles que estiveram ao meu
lado em cada etapa desta jornada.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por me capacitar e iluminar meu caminho durante esta jornada. Devo a ele toda a força e sabedoria que me guiaram até este momento.

Aos meus queridos familiares, expresso minha gratidão pela confiança e apoio ao longo deste percurso. A demonstração de amor e encorajamento foram essenciais para me sustentar nos momentos desafiadores.

Aos meus respeitados professores, sou imensamente grato pelo conhecimento compartilhado e pela orientação que moldou meu entendimento e ampliou minha visão de mundo.

E aos meus queridos amigos, agradeço por todo o auxílio, gestos de apoio e momentos de descontração que trouxeram leveza a esta jornada acadêmica.

Que este trabalho seja uma expressão sincera de minha gratidão a todos aqueles que fizeram parte desta trajetória

"Confia no Senhor de todo o teu coração e não te
estribes no teu próprio entendimento." -
(BÍBLIA, VERSÃO ARC; PROVÉRBIOS 3:5).

RESUMO

Este estudo analisou o desempenho de um fluido de corte de origem vegetal, composto por 10% de óleo de moringa e tensoativos e 90% de água, aplicado em processos de usinagem de ligas de alumínio 6011. A fim de avaliar de maneira abrangente o desempenho desses fluidos, o estudo detalha os parâmetros e métodos de avaliação. O estudo teve como objetivo identificar alternativas ecoeficientes aos fluidos convencionais, com foco na sustentabilidade. Os resultados indicaram que, embora o fluido vegetal tenha apresentado cavacos com maior irregularidade, sugerindo uma menor eficiência na lubrificação, ele proporcionou menor desgaste nas ferramentas, potencialmente prolongando sua vida útil. As temperaturas registradas durante a usinagem foram ligeiramente maiores com o fluido vegetal, mas dentro de uma faixa aceitável. Conclui-se que o fluido de origem vegetal apresenta potencial como uma alternativa mais sustentável aos fluidos convencionais, especialmente em aplicações onde a durabilidade da ferramenta é crítica.

Palavras-chave: fluido convencionais; sustentabilidade; usinagem; vantagens ambientais.

ABSTRACT

This study analyzed the performance of a vegetable-based cutting fluid, composed of 10% moringa oil and surfactants and 90% water, applied in machining processes of 6011 aluminum alloys. In order to comprehensively assess the performance of these fluids, the study details the parameters and evaluation methods. The study aimed to identify eco-efficient alternatives to conventional fluids, with a focus on sustainability. The results indicated that, although the vegetable fluid produced chips with greater irregularity, suggesting lower lubrication efficiency, it resulted in less tool wear, potentially extending tool life. The temperatures recorded during machining were slightly higher with the vegetable fluid but remained within an acceptable range. It is concluded that the vegetable-based cutting fluid shows potential as a more sustainable alternative to conventional fluids, especially in applications where tool durability is critical.

Keywords: conventional fluids; sustainability; machining; environmental advantages.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Alinhamento das moléculas polares (óleos vegetais) em comparação com moléculas apolares (óleos minerais)	19
Figura 2 – Fluxograma das atividades realizadas	25
Figura 3 - Fotografia do equipamento CNC Router spindle TVS.1ZM3.12	26
Figura 4 – Fresa topo de aço rápido 6mm.....	28
Figura 5 – Spindle TVS.1ZM3.12	29
Figura 6 – Instalação da fresa topo e zeramento da primeira usinagem	29
Figura 7 – Pisseta graduada com tampa azul bico curvo	30
Figura 8 – Chapa de 6mm alumínio 6011	31
Figura 9 – Upload e simulação finalizada do código G.....	31
Figura 10 - Qualidade das superfícies usinadas.	38
Figura 11 - Simulação Software Mach3 CNC Controller	39
Figura 12 – Start processo de zeramento peça	39
Figura 13 – Processo de usinagem em desenvolvimento	40
Figura 14 – Presença do cavaco durante usinagem CNC.....	40
Figura 15 – Sacos plásticos com os respectivos cavados identificados.....	41
Figura 16 – Usinagem a 150 mm/min com: a) fluido convencional, b) fluido vegetal.....	42
Figura 17 - Usinagem a 150 mm/min com: a) fluido convencional, b) fluido vegetal.....	43
Figura 18 - Usinagem a 150 mm/min com: a) fluido convencional, b) fluido vegetal.....	43
Figura 19 - Usinagem a 150 mm/min com: a) fluido convencional, b) fluido vegetal.....	44
Figura 20 - Usinagem a 200 mm/min com: a) fluido convencional, b) fluido vegetal.....	45
Figura 21 - Usinagem a 200 mm/min com: a) fluido convencional, b) fluido vegetal.....	46
Figura 22 - Usinagem a 250 mm/min com: a) fluido convencional, b) fluido vegetal.....	47
Figura 23 - Usinagem a 250 mm/min com: a) fluido convencional, b) fluido vegetal.....	47
Figura 24 - Usinagem a 300 mm/min com: a) fluido convencional, b) fluido vegetal.....	48
Figura 25 - Usinagem a 300 mm/min com: a) fluido convencional, b) fluido vegetal.....	49
Figura 26 - Gume 1 da fresa na usinagem com: a) fluido convencional, b) fluido vegetal.....	50
Figura 27 - Gume 2 da fresa na usinagem com: a) fluido convencional, b) fluido vegetal.....	51
Figura 28 - Gume 3 da fresa na usinagem com: a) fluido convencional, b) fluido vegetal.....	51
Figura 29 - Gume 4 da fresa na usinagem com: a) fluido convencional, b) fluido vegetal.....	52

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 1 - Características do óleo de mamona em aplicações como lubrificante	23
Tabela 2 - Características físico-químicas óleo de algodão.	24
Quadro 1 – Parâmetros de Usinagem.....	33
Tabela 3 – Configurações de Usinagem.....	36
Tabela 4 – Temperaturas durante usinagem fluido de corte convencional.	53
Tabela 5 – Temperaturas durante usinagem fluido de corte vegetal.....	54

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVOS	13
2.1	Objetivos específicos.....	13
3	REFERENCIAL TEÓRICO	14
3.1	Tipos de fluidos de corte	14
3.1.1	Fluidos de corte sintéticos	14
3.1.2	Fluidos de corte semissintéticos	14
3.1.3	Fluidos de corte minerais	15
3.2	Características físico-químicas e propriedades importantes	15
3.3	Processos de usinagem e a importância dos fluidos de corte	17
3.4	Fluidos de corte de origem vegetal	18
3.5	Avaliação de desempenho de fluidos de corte	19
3.6	Benefício da utilização do fluido de base vegetal	21
3.7	Caracterização dos fluidos de corte de origem vegetal	21
3.7.1	Técnicas de caracterização de fluidos de corte:.....	22
3.7.2	Análise de propriedades físicas, químicas e reológicas:	22
4	METODOLOGIA	25
4.1	Preparação e homogeneização do fluido	25
4.1.1	Formulação do fluido de corte:	25
4.2	Avaliação do Desempenho em Condições de Usinagem	26
4.2.1	Preparação do equipamento e amostragem	26
4.2.2	Configuração da router para simulação de usinagem:	27
4.2.3	Avaliação do potencial de refrigeração.....	27
4.2.4	Avaliação do potencial de lubrificação.....	27
4.3	Montagem do Banco de Ensaio	27
4.3.1	Equipamentos Utilizados	27
4.3.2	Preparação do Equipamento	29
4.3.3	Configuração do Sistema de Aplicação de Fluido de Corte	30
4.3.4	Materiais de Teste	30
4.3.5	Software de Controle	31
4.4	Parâmetros de Usinagem	32
4.4.1	Parâmetros de Corte	32
4.4.2	Justificativa para a Seleção dos Parâmetros.....	33

4.4.3	Procedimentos de Usinagem	34
4.5	Técnicas de Avaliação do Fluido de Corte	34
4.5.1	Avaliação do Desgaste da Ferramenta	35
4.5.2	Qualidade da Superfície Usinada	35
4.5.3	Análise dos Cavacos	35
4.5.4	Eficiência da Refrigeração e Lubrificação	35
4.5.5	Análise Estatística	35
4.5.6	Alterações de Configurações para Comparação	36
4.5.7	Quantidade de Peças a Serem Fresadas.....	36
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	38
5.1	Procedimento de Usinagem e a Qualidade da Superfície.....	38
5.2	Características dos Cavacos.....	41
5.2.1	Usinagem a 150 mm/min.....	41
5.2.2	Usinagem a 200 mm/min.....	44
5.2.3	Usinagem a 250 mm/min.....	46
5.2.4	Usinagem a 300 mm/min.....	48
5.3	Desgaste da Ferramenta	49
5.4	Temperaturas de Usinagem.....	52
6	CONCLUSÃO	55
	REFERÊNCIAS.....	56

1 INTRODUÇÃO

A indústria de usinagem desempenha um papel crucial na fabricação de componentes metálicos, e um dos fatores fundamentais para o sucesso nesse processo é a escolha adequada do fluido de corte, a viabilidade do uso de fluidos sustentáveis como fluido de corte alternativo para diminuir o impacto direto com o meio ambiente e melhoria no processo tribológico (Santos e Cunha, 2022).

Este trabalho visa caracterizar e avaliar o desempenho de um fluido de corte de origem vegetal destinado à aplicação em processos de usinagem em metais como o alumínio 6011. Para alcançar esse objetivo, a investigação abrange diversas etapas, incluindo uma revisão bibliográfica abrangente (MAIA et al., 2011), trazendo as consequências que segundo (CHIAVERINI, 1977, KORKUT, et al. 2003) A usinagem desses materiais sem fluido de corte (a seco) apresentam altos índices de rugosidades, elevadas forças de corte na qual aceleram o desgaste na ferramenta, conseqüentemente, esses parâmetros irão refletir na baixa qualidade e alto custo de fabricação da peça e segundo Lisboa, Moraes, Hirashita (2013, p15) ainda quanto aos critérios de seleção, destacamos: a análise econômica, posto que o lucro é o objetivo final de qualquer empresa e todas as variantes de um processo vão influenciar direta ou indiretamente no custo final do produto.

A revisão bibliográfica percorre a história e a evolução dos fluidos de corte, tipos de fluidos e suas aplicações, propriedades físicas e químicas destes, e tendências e perspectivas futuras. Também é abordada a caracterização dos fluidos de corte, bem como seu desempenho durante a usinagem. Além disso, a pesquisa envolve a avaliação do desempenho dos fluidos por meio de testes, como o teste de usinabilidade, de vida útil, corrosão e análise do impacto ambiental (FUJITA et al., 2008).

Por fim, a pesquisa busca apresentar os resultados obtidos, discutindo como os novos fluidos de corte podem ser implementados na indústria, seus benefícios em relação aos já existentes e mais comuns e análise das principais oportunidades de pesquisa futura (SANTOS et al., 2018).

2 OBJETIVOS

Os objetivos gerais desta pesquisa é avaliar os resultados obtidos no processo de fresamento na liga de alumínio 6011 utilizando fluido de corte vegetal de moringa oleífera por meio da amostragem das usinagens realizadas.

2.1 Objetivos específicos

Os objetivos específicos do trabalho em questão podem ser descritos como:

- Avaliar o desempenho em condições reais de usinagem, considerando sua capacidade de lubrificação, resfriamento e resistência à oxidação;
- Aferir a superfície por meio da inspeção visual (defeitos superficiais);
- Analisar a eficiência do lubrificante por meio da análise de cavacos e as decorrências apresentadas nos gumes da fresa.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

Os fluidos de corte são substâncias líquidas ou gasosas amplamente empregadas em processos de usinagem, desempenhando um papel essencial na otimização do processo. Conforme Fernanéz-Gonzáles et al., (2016), essas substâncias são cruciais para melhorar o desempenho das ferramentas de corte, reduzir o desgaste e facilitar a remoção de cavacos. Em outras palavras, eles são agentes indispensáveis para o aprimoramento da eficiência das operações de usinagem.

3.1 Tipos de fluidos de corte

Os fluidos de corte desempenham um papel crucial na indústria de usinagem, e sua escolha é determinante para o sucesso de uma operação. Existem três tipos principais de fluidos de corte líquidos, cada um com características distintas:

3.1.1 Fluidos de corte sintéticos

Os fluidos de corte sintéticos são formulados a partir de produtos químicos sintéticos, excluindo óleos minerais em sua composição. Eles são conhecidos por oferecerem uma série de vantagens importantes, dentre elas estão:

- Excelente lubrificação: Os fluidos sintéticos proporcionam uma excelente capacidade de lubrificação, reduzindo o atrito entre a ferramenta de corte e a peça. Isso minimiza o desgaste da ferramenta e prolonga sua vida útil.
- Resfriamento eficaz: Eles também são altamente eficazes no resfriamento da zona de corte, dissipando o calor gerado durante a usinagem. Isso é fundamental para evitar o superaquecimento da peça e a deformação térmica.
- Biodegradabilidade: Uma vantagem ambiental importante dos fluidos de corte sintéticos é sua biodegradabilidade. Eles tendem a ser menos prejudiciais ao meio ambiente do que os fluidos à base de óleo mineral.

3.1.2 Fluidos de corte semissintéticos

Os fluidos semissintéticos são uma combinação de óleos minerais com aditivos sintéticos. Eles são escolhidos frequentemente devido à sua versatilidade e equilíbrio entre desempenho e custo. Suas principais características incluem:

- Versatilidade: Esses fluidos são adequados para uma ampla variedade de aplicações de usinagem, desde operações de alta velocidade até processos de corte pesados.
- Boa estabilidade emulsionante: Os fluidos semissintéticos possuem boa estabilidade emulsionante, o que significa que eles permanecem bem misturados com água, formando uma emulsão estável.
- Resfriamento adequado: Eles também fornecem um resfriamento adequado para a zona de corte, ajudando a controlar a temperatura da peça e prolongar a vida útil da ferramenta.

3.1.3 Fluidos de corte minerais

Os fluidos de corte minerais têm como base óleos minerais, geralmente com a adição de poucos ou nenhum aditivo. Eles são empregados em operações de usinagem menos exigentes, onde não são necessários os benefícios dos fluidos sintéticos. Suas principais características são:

- Menor custo: Fluidos minerais são geralmente mais acessíveis em termos de custos em comparação com os sintéticos e semissintéticos.
- Aplicações simples: Eles são adequados para operações de usinagem simples e de baixa complexidade, onde a refrigeração e a lubrificação básicas são suficientes.

3.2 Características físico-químicas e propriedades importantes

Os fluidos de corte são submetidos a uma série de testes e análises para determinar suas características físico-químicas e propriedades que desempenham um papel crucial no desempenho durante os processos de usinagem. As principais características e propriedades incluem a viscosidade, o pH, o ponto de fulgor, a estabilidade da emulsão, a resistência à oxidação, compatibilidade com materiais utilizados nos processos de usinagem e biodegradabilidade.

A viscosidade é a resistência do fluido ao fluxo e é medida em centistokes (cSt) a uma temperatura específica. A viscosidade adequada é essencial para garantir que o fluido flua de maneira consistente e eficaz por meio do sistema de lubrificação da máquina. Fluidos de corte com viscosidade inadequada podem resultar em

desgaste prematuro da ferramenta de corte (Silva, J. G. et al., 2019; Nguyen, N. T. et al., 2010).

O pH é uma medida da acidez ou alcalinidade de um fluido. Os fluidos de corte geralmente têm um pH controlado para evitar a corrosão da ferramenta e da peça. Fluidos com pH inadequado podem causar problemas de corrosão, reduzindo a vida útil da ferramenta e afetando a qualidade da peça usinada (Silva, J. G. et al., 2019; Fujita, M. et al., 2008).

O ponto de fulgor é a temperatura mínima à qual um fluido de corte emite vapores inflamáveis que podem formar uma mistura inflamável com o ar. É uma consideração crítica em termos de segurança, pois baixos pontos de fulgor aumentam o risco de incêndio na oficina. Fluidos de corte com pontos de fulgor mais altos são preferidos por razões de segurança (Silva, J. G. et al., 2019; Lopez de Lacalle, L. N. et al., 2016).

A estabilidade da emulsão se refere à capacidade do fluido de corte de manter uma mistura estável com a água. Em aplicações onde a água é adicionada ao fluido para melhorar o resfriamento e a lubrificação, a estabilidade da emulsão é crucial para garantir um desempenho consistente (Silva, J. G. et al., 2019; Gan, Z. et al., 2016).

Fluidos de corte estão sujeitos a altas temperaturas devido à fricção durante a usinagem. Portanto, a resistência à oxidação e degradação térmica é importante. Fluidos que resistem bem a esses processos tendem a manter suas propriedades por mais tempo, proporcionando vida útil prolongada ao fluido (Silva, J. G. et al., 2019; Lopez de Lacalle, L. N. et al., 2016).

A compatibilidade com materiais é uma propriedade crítica, pois os fluidos de corte não devem causar danos às peças usinadas. Fluidos inadequadamente formulados podem manchar ou corroer materiais, prejudicando a qualidade das peças usinadas (Silva, J. G. et al., 2019; Gan, Z. et al., 2016).

Conforme apresentado por Portney (2015), a sustentabilidade está intrinsecamente relacionada à capacidade de um fenômeno ou processo perdurar ao longo do tempo sem ocasionar impactos adversos sobre o ambiente externo. Nesse contexto, a manufatura sustentável é caracterizada pela produção que se desenvolve sem causar danos significativos ao meio ambiente ou à sociedade em geral. Em outras palavras, a manufatura sustentável engloba a implementação de técnicas, tecnologias e procedimentos destinados a eliminar ou minimizar os efeitos negativos, sejam eles ambientais ou sociais, enquanto ainda mantém a viabilidade econômica.

Portanto, pode-se afirmar que a manufatura sustentável prioriza a eficiência dos processos, levando em consideração as dimensões econômicas, ambientais e sociais, constituindo assim o fundamento trifásico do conceito de sustentabilidade (Portney, 2015). A busca global por modelos de negócios sustentáveis representa um desafio significativo para a manufatura, que historicamente tem utilizado recursos naturais de forma indiscriminada, especialmente após as primeiras revoluções industriais.

As características físico-químicas e propriedades dos fluidos de corte podem variar amplamente entre os diferentes tipos (sintéticos, semissintéticos e minerais) e marcas comerciais. Portanto, a seleção adequada desses fluidos deve levar em consideração as demandas específicas do processo de usinagem e as recomendações dos fabricantes.

3.3 Processos de usinagem e a importância dos fluidos de corte

Os processos de usinagem são essenciais na indústria de fabricação, envolvendo a remoção de material de uma peça bruta para criar componentes com formas e dimensões precisas. A eficácia desses processos depende de vários fatores, incluindo o uso de fluidos de corte adequados (Miyoshi et al., 2007).

O torneamento é um dos processos de usinagem mais comuns, envolvendo a rotação da peça de trabalho enquanto uma ferramenta de corte se move longitudinalmente. A importância dos fluidos de corte nesse processo é notável, pois eles auxiliam na dissipação do calor gerado pela fricção entre a ferramenta e a peça. Além disso, os fluidos de corte melhoram a qualidade da superfície da peça e prolongam a vida útil da ferramenta de corte (Machado & Silva, 2020; Nguyen et al., 2010).

No fresamento, uma ferramenta rotativa remove material da peça de trabalho. A presença de fluidos de corte é crucial para reduzir o desgaste da ferramenta e manter a temperatura da usinagem sob controle. Isso resulta em acabamentos de superfície mais suaves e maior produtividade (Fujita et al., 2008; Júnior, 2012).

Os fluidos de corte são indispensáveis nesse processo, pois ajudam a evitar o superaquecimento da peça e da ferramenta, o que pode resultar em danos e diminuição da qualidade da usinagem (Silva & Correia, 2017; Ferreira et al., 2017).

A furação é um processo comum para criar furos em peças. Os fluidos de corte são utilizados para resfriar a broca, reduzir o atrito e remover os cavacos de forma eficiente, garantindo um furo preciso (Araújo & Silva, 2019; Oliveira & Correia, 2017).

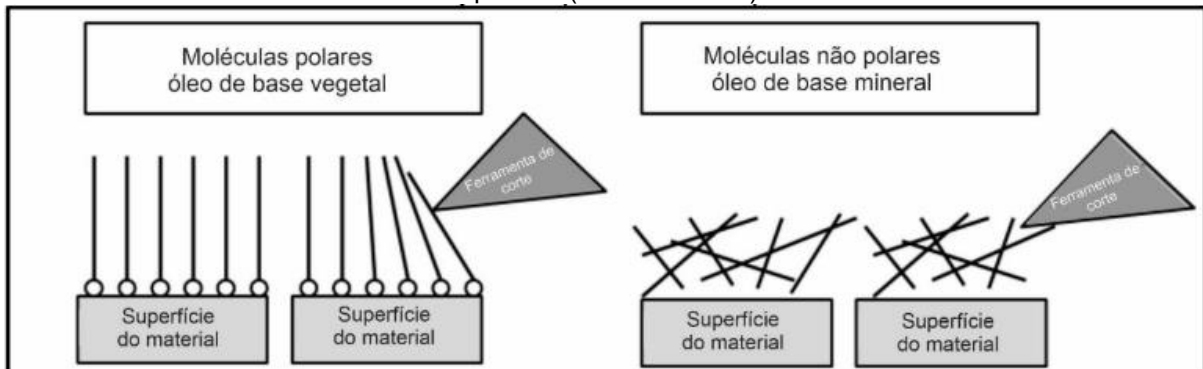
Esses exemplos destacam a importância crítica dos fluidos de corte nos processos de usinagem, contribuindo para a qualidade, eficiência e vida útil das ferramentas e das peças usinadas (Menezes et al., 2020; Silva et al., 2019).

3.4 Fluidos de corte de origem vegetal

Os fluidos de corte de origem vegetal representam uma categoria em crescimento no campo da usinagem, devido às preocupações ambientais e à busca por alternativas mais sustentáveis em comparação com os fluidos de corte convencionais. A natureza polar das moléculas presentes nos óleos vegetais provoca seu alinhamento na superfície metálica, criando um filme lubrificante que é capaz de suportar consideráveis tensões, resultando na redução das forças de usinagem. As moléculas de triacilglicerol, que formam a base dos óleos vegetais, se organizam de maneira a orientar suas extremidades polares em direção à superfície do metal, gerando uma estrutura em camadas.

Esse fenômeno prático se traduz em um filme superficial com potencial para evitar o contato direto entre as superfícies metálicas e retardar o desgaste das asperezas. Devido à presença de grupos polares e cadeias longas de hidrocarbonetos, os óleos vegetais são naturalmente surfactantes anfifílicos, o que lhes permite ser usados como lubrificantes altamente eficazes na redução do atrito e desgaste (Figura 1). No entanto, é importante observar que esses óleos vegetais tendem a ter uma menor capacidade de resistência a pressões extremas em comparação com os óleos minerais, como apontado por SYAHIR et al. em 2017.

Figura 1 - Alinhamento das moléculas polares (óleos vegetais) em comparação com moléculas apolares (óleos minerais)



Fonte: (CARVALHO, 2023).

A obtenção de óleos vegetais para a fabricação de fluidos de corte de origem vegetal envolve métodos de extração específicos. O método de prensagem a frio é amplamente utilizado e envolve a extração do óleo a partir das sementes oleaginosas sem o uso de calor, preservando assim as características naturais do óleo. Outro método é a extração por solvente, que utiliza produtos químicos para separar o óleo das sementes. Por fim, a extração por destilação a vapor é uma técnica que envolve a passagem de vapor através das sementes para extrair o óleo. Cada método tem suas vantagens e desvantagens, afetando as propriedades do fluido de corte resultante (Smith et al., 2019).

Os fluidos de corte de origem vegetal exibem uma série de propriedades físico-químicas importantes que afetam seu desempenho na usinagem. Isso inclui sua viscosidade, que determina a capacidade de lubrificação e a facilidade de aplicação, bem como seu ponto de fulgor, que está relacionado à segurança durante o manuseio e o armazenamento. Além disso, o pH do fluido de corte é crucial, pois afeta a corrosão das ferramentas e das peças usinadas. Em relação ao desempenho nos processos de usinagem, esses fluidos de origem vegetal têm demonstrado eficácia na redução do desgaste da ferramenta, na melhoria da qualidade da superfície usinada e na minimização da formação de cavacos (Gomes et al., 2020).

3.5 Avaliação de desempenho de fluidos de corte

A avaliação do desempenho dos fluidos de corte desempenha um papel fundamental na indústria de usinagem, onde a escolha adequada desses fluidos pode influenciar significativamente a eficiência dos processos de fabricação (SMITH, 2018).

A medição do desempenho dos fluidos de corte envolve a análise de vários parâmetros. Um dos principais é a capacidade de lubrificação, que é crucial para reduzir o atrito entre a ferramenta de corte e a peça. Testes de lubrificação, como o teste de atrito por pino sobre disco, são comuns para avaliar esse aspecto. Além disso, a capacidade de refrigeração dos fluidos é avaliada por meio de testes de dissipação de calor (JOHNSON, 2019).

A estabilidade térmica também é um fator crítico. Os fluidos de corte estão sujeitos a altas temperaturas durante a usinagem, o que pode levar à degradação e à formação de depósitos prejudiciais. Testes de estabilidade térmica são utilizados para avaliar a capacidade do fluido de manter suas propriedades em condições de alta temperatura (GARCIA et al., 2020).

A seleção adequada de fluidos de corte é determinada por critérios específicos, que incluem o material da peça, o processo de usinagem e os requisitos de acabamento da superfície. Além disso, considerações econômicas e ambientais desempenham um papel importante. Os fluidos de corte devem ser compatíveis com os materiais usinados e contribuir para a melhoria da eficiência do processo, reduzindo o desgaste das ferramentas e prolongando sua vida útil (ANDERSON, 2017).

A avaliação comparativa entre fluidos de corte de origem vegetal e fluidos convencionais é fundamental para determinar a viabilidade e eficácia desses novos fluidos na indústria de usinagem. Os testes de desempenho são projetados para abordar uma variedade de fatores críticos, incluindo a eficiência de lubrificação, dissipação de calor e estabilidade térmica.

- A capacidade de lubrificação é um fator-chave para a eficácia dos fluidos de corte. Testes comparativos envolvem a medição da resistência ao atrito entre a ferramenta de corte e a peça usinada. Fluidos de corte de origem vegetal geralmente são formulados para oferecer excelente lubrificação, o que pode resultar em menor desgaste das ferramentas e uma vida útil prolongada das ferramentas de corte em comparação com fluidos convencionais (LEE, 2021).
- Durante a usinagem, o calor gerado pode afetar negativamente o desempenho das ferramentas e a qualidade das peças usinadas. Testes de dissipação de calor são realizados para avaliar a capacidade dos fluidos de corte em remover eficazmente o calor da zona de corte. Fluidos de corte

à base de óleos vegetais geralmente apresentam boa capacidade de dissipação de calor devido às suas propriedades de alta viscosidade e condutividade térmica (GARCIA et al., 2020).

- A estabilidade térmica é crucial para manter o desempenho do fluido de corte ao longo do tempo, especialmente em condições de alta temperatura. Os testes de estabilidade térmica avaliam a capacidade do fluido de manter suas propriedades químicas e físicas em condições de usinagem de alta temperatura. Fluidos de corte de origem vegetal muitas vezes demonstram maior estabilidade térmica em comparação com fluidos convencionais, minimizando a degradação do fluido durante o processo (JOHNSON, 2019).

Através desses testes, é possível determinar como os fluidos de corte de origem vegetal se comparam aos fluidos convencionais em termos de desempenho. Essa análise é essencial para orientar a escolha adequada dos fluidos em diferentes aplicações de usinagem, considerando fatores como eficiência, custo e sustentabilidade ambiental.

3.6 Benefício da utilização do fluido de base vegetal

Os fluidos de corte de base vegetal apresentam vantagens ao serem comparados aos fluidos convencionais no contexto de sustentabilidade ao meio ambiente. Efeitos sustentáveis, como qualidade de superfície melhorada, uso de energia reduzido e menos desgaste da ferramenta resultaram devido ao fornecimento eficaz de refrigerante (Molla et al., 2022)

Outro aspecto importante ao analisar a biodegradabilidade dos cenários proposto entre os fluidos vegetais e convencionais, é relevante ressaltar, segundo Molla et al, (2022) “Óleos vegetais estão sendo investigados como uma forma potencial de fluidos de corte ecologicamente corretos devido à sua excelente renovabilidade, biodegradabilidade e desempenho lubrificante”.

3.7 Caracterização dos fluidos de corte de origem vegetal

A caracterização dos fluidos de corte de origem vegetal envolve a aplicação de diversas técnicas analíticas para avaliar suas propriedades físicas, químicas e reológicas. Essa análise detalhada é fundamental para compreender a composição e

o comportamento desses fluidos, permitindo sua otimização e adaptação para diferentes processos de usinagem.

3.7.1 Técnicas de caracterização de fluidos de corte:

- Espectroscopia: A espectroscopia, em suas várias formas (UV-Vis, infravermelho, Raman, entre outras), é uma técnica amplamente utilizada para identificar e quantificar componentes químicos nos fluidos de corte. Ela permite a análise de grupos funcionais, identificação de aditivos e acompanhamento de reações químicas em tempo real (SMITH et al., 2018).
- Cromatografia: A cromatografia, incluindo a cromatografia líquida de alta eficiência (HPLC) e a cromatografia gasosa (GC), é empregada para separar e quantificar os componentes orgânicos presentes nos fluidos. Essa técnica é valiosa para a determinação de óleos vegetais, aditivos e produtos de degradação (FARIA et al., 2019).
- Reometria: A reometria é utilizada para avaliar as propriedades reológicas dos fluidos de corte, como viscosidade, elasticidade e comportamento de fluxo. Isso é crucial para entender como esses fluidos se comportarão durante a usinagem e sua capacidade de lubrificação (ZHANG et al., 2020).

3.7.2 Análise de propriedades físicas, químicas e reológicas:

- Propriedades Físicas: A caracterização física dos fluidos de corte inclui a medição de propriedades como densidade, ponto de fulgor, ponto de fluidez e índice de refração. Esses parâmetros são importantes para garantir a segurança no manuseio e armazenamento dos fluidos (KIM et al., 2017).
- Propriedades Químicas: Além da composição química, as propriedades químicas dos fluidos de corte, como o pH, são fundamentais para determinar a estabilidade do fluido e sua compatibilidade com os materiais usinados. Fluidos de corte de origem vegetal geralmente possuem pH neutro ou ligeiramente alcalino, o que reduz o risco de corrosão (LIU et al., 2019).

- **Propriedades Reológicas:** A avaliação das propriedades reológicas, como a viscosidade e a tensão de cisalhamento, é crucial para entender como o fluido de corte se comportará durante a usinagem. Fluidos de corte à base de óleos vegetais podem apresentar viscosidade variável em diferentes temperaturas, o que afeta sua capacidade de lubrificação em várias aplicações (HUANG et al., 2021).

A título de exemplo, há o óleo de mamona, que de acordo com Campos e Santos (2015), é notavelmente mais lubrificante do que outros óleos vegetais, com um aumento de 30% na sua capacidade lubrificante. Sousa Júnior et al. (2022) destacam a versatilidade do óleo de mamona, que pode ser empregado em várias aplicações, incluindo a fabricação de tintas, isolantes, lubrificantes, cosméticos, produtos farmacêuticos e diversos processos industriais.

No entanto, conforme apontado por Soares (2013), apesar das suas qualidades como óleo lubrificante, o óleo de mamona possui uma desvantagem significativa, que é a sua baixa estabilidade à oxidação. Ele também é caracterizado por sua alta viscosidade, baixo coeficiente de atrito e a notável capacidade de solubilidade em álcool, mas não em óleos minerais, devido à presença de grupos hidroxila em sua estrutura. Alguns dados sobre suas propriedades físico-químicas podem ser encontrados na Tabela 1.

Tabela 1 - Características do óleo de mamona em aplicações como lubrificante

Ácidos Graxos	Propriedades físico-químicas			Valor
Saturados	C12	-	Viscosidade cinemática a 40 °C (cST)	252
	C14	-	Viscosidade cinemática a 100 °C	19
	C16	-	Índice de Viscosidade	90
	C18	0,3	Valor de lodo	83
Insaturados	C18:1	8,2	Índice de saponificação, (mg/KOH)	178
	C18:2	3,6	Índice de Acidez, mg KOH/g)	< 4
	C18:3	-	Ponto de Fluidez, (°C)	-10
Ácido Ricinoleico	C18:1-OH	87,6	Ponto de Fulgor, (°C)	> 300

Fonte: (Soares, 2013).

Enquanto isso, Coêlho (2021), retratou as características físico-químicas para o óleo de algodão como alternativa viável na utilização em processos de usinagem, diferindo do óleo de mamona principalmente ao que diz respeito à sua viscosidade cinemática e índice de acidez serem muito menores (Tabela 2).

Tabela 2 - Características físico-químicas óleo de algodão.

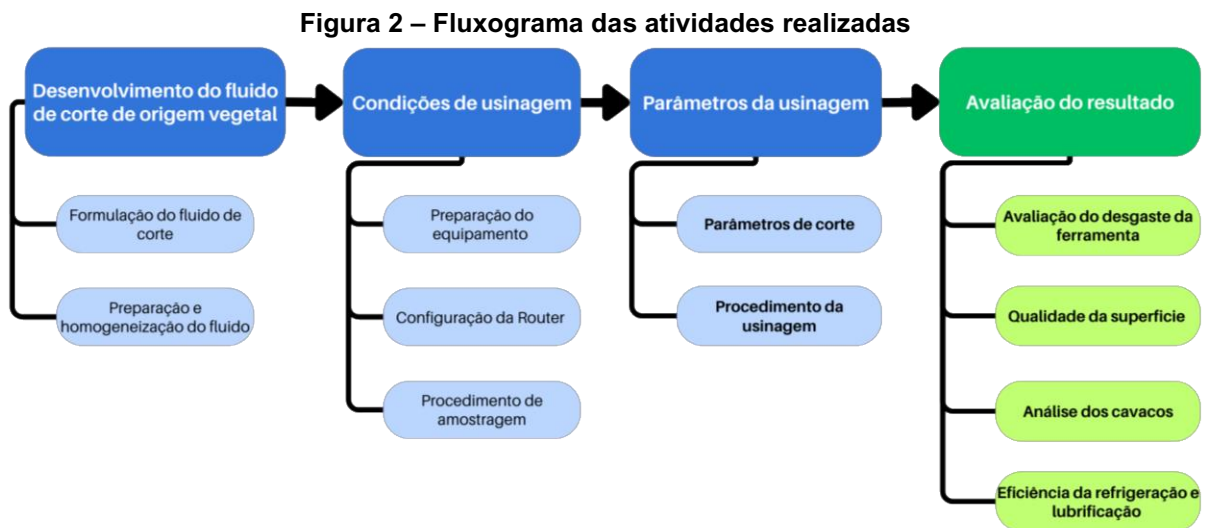
Peso específico a 20 °C (g/cm ³)	0,92
Viscosidade cinemática a 40 °C (cST)	40
Valor de lodo	96-115
Índice de saponificação (mg/KOH)	189-198
Índice de Acidez (mg KOH/g)	< 0,3
Ponto de Fluidez (°C)	-7
Ponto de Fulgor (°C)	> 300

Fonte: (Coêlho, 2021).

A caracterização abrangente dos fluidos de corte de origem vegetal fornece informações essenciais para sua formulação e aplicação eficaz na indústria de usinagem, contribuindo para melhorias no desempenho, na durabilidade das ferramentas e na sustentabilidade ambiental.

4 METODOLOGIA

A Figura 2 representa a metodologia proposta que abrangerá todas as etapas necessárias para alcançar os objetivos do trabalho, desde o desenvolvimento da amostragem do fluido de corte vegetal até a avaliação e o desempenho do mesmo.



Fonte: (Autoria própria, 2024).

4.1 Preparação e homogeneização do fluido

A preparação e homogeneização do fluido possui etapas essenciais para que a operação ocorra com sucesso, desde o uso correto da dosagem dos componentes até a homogeneização da mistura com a finalidade de se obter o máximo das propriedades lubrificantes e refrigerantes do fluido.

4.1.1 Formulação do fluido de corte:

É necessário estar diretamente conectado a qualidade e desempenho do processo para garantir a eficiência e a eficácia durante a formulação do fluido de corte, portanto, temos três etapas essenciais para a correta implementação da formulação:

- Elaboração e estruturação do fluido de corte;
- Procedimento de preparação do fluido;
- Métodos de homogeneização para garantir uma mistura uniforme.

4.2 Avaliação do Desempenho em Condições de Usinagem

Nesta seção encontra-se as etapas desde a preparação e configuração do equipamento CNC e os procedimentos de avaliação da amostragem. A Figura 3 representa a CNC Router spindle, cujo equipamento apresenta alta precisão e desempenho confiável e o mesmo é projetado para operar em velocidades elevadas, e foi utilizado para o desenvolvimento do processo de usinagem do banco de ensaios.

Figura 3 - Fotografia do equipamento CNC Router spindle TVS.12M3.12



Fonte: (Autoria própria, 2024).

4.2.1 Preparação do equipamento e amostragem

De modo a garantir a precisão e confiabilidade do processo é essencial realizar a limpeza e calibração. A limpeza foi realizada com o objetivo de eliminar variáveis de contaminantes e posteriormente foi realizado um aferimento do equipamento por meio de coletas de amostras para determinar se o mesmo está devidamente calibrado.

4.2.2 Configuração da router para simulação de usinagem:

Os ensaios de laboratório serão conduzidos na fresadora CNC Router spindle TVS.1ZM3.12, cujo equipamento apresenta as seguintes características

Velocidade de rotação (máxima): 18000 rpm;

Potência nominal: 1CV.

4.2.3 Avaliação do potencial de refrigeração

A análise da capacidade de resfriamento do fluido será determinada por meio de três aspectos, sendo eles:

- Medição de temperatura: Será aferida por meio da medição da temperatura da zona usinagem antes e após o resfriamento. Isso permite a determinação da capacidade do fluido em absorver e dissipar calor.
- Taxa de fluxo: Fluxo constante do fluido de corte durante o processo de usinagem para analisar a capacidade de remover o calor gerado pelo atrito entre a ferramenta e a peça.

4.2.4 Avaliação do potencial de lubrificação

Esta seção abrange a observação do desgaste da ferramenta por meio do uso do fluido no processo de usinagem, a observação do desgaste fornece *insights* sobre a proteção oferecida pelo fluido de corte e a redução de atrito, de modo a prolongar a vida útil da ferramenta. Portanto, os dois tópicos analisados:

- Observação do desgaste da ferramenta de usinagem;
- Análise da eficácia do fluido ao observar o desgaste da ferramenta.

4.3 Montagem do Banco de Ensaio

Para a realização dos ensaios necessários à avaliação do fluido de corte de origem vegetal, foi montado um banco de ensaios adequado, utilizando uma Router CNC equipada com uma fresa de 6 mm e um Router spindle TVS.1ZM3.12. A seguir, detalham-se os componentes e procedimentos adotados na montagem do banco de ensaios.

4.3.1 Equipamentos Utilizados

A seguir será listado os materiais utilizados no processo de usinagem:

- Router CNC: Máquina de usinagem CNC (Figura 3) capaz de realizar fresamento em alta precisão. O modelo utilizado foi escolhido por sua compatibilidade com o tipo de fresa e o material a ser usinado. (Retirar informação repetida)
- Fresa topo de 6 mm: A Figura 4 representa a ferramenta de corte de aço rápido HSS com diâmetro de 6 mm, adequada para o fresamento das ligas de alumínio 6011. A fresa foi selecionada levando em consideração a geometria e o material das ligas. (Retirar informação repetida)

Figura 4 – Fresa topo de aço rápido 6mm



Disponível em: <https://www.tudoferramentas.com.br/MLB-953260027-fresa-de-topo-aco-rapido-4-cortes-6mm-rocast-3-pecas- JM#&gid=1&pid=2>. Acesso em: 13 de agosto de 2024.

- Router spindle TVS.1ZM3.12: A Figura 5 representa o Spindle de alta rotação, essencial para garantir a velocidade e a precisão necessárias durante os ensaios de fresamento. Este modelo oferece estabilidade e controle durante o processo de usinagem.

Figura 5 – Spindle TVS.1ZM3.12



Fonte: (Autoria própria, 2024).

4.3.2 Preparação do Equipamento

A Figura 6 reproduz o primeiro zeramento da usinagem e a instalação da fresa topo de 6 mm no spindle da router CNC, garantindo que estivesse bem fixada e alinhada para evitar vibrações ou desalinhamentos durante o fresamento.

Figura 6 – Instalação da fresa topo e zeramento da primeira usinagem



Fonte: (Autoria própria, 2024).

O Spindle TVS.1ZM3.12 (Figura 5) foi configurado para operar nas velocidades adequadas para o material e a fresa utilizados. A velocidade de rotação foi ajustada conforme as especificações do fabricante e os requisitos do ensaio.

4.3.3 Configuração do Sistema de Aplicação de Fluido de Corte

A Figura 7 representa o aplicador utilizado para a distribuição do fluido na região de usinagem, a vazão do fluido de corte pela Pisseta foi calibrada para garantir que a quantidade aplicada fosse suficiente para lubrificar e resfriar a área de corte, mas sem excessos que pudessem resultar em desperdício ou contaminação do ambiente de trabalho.

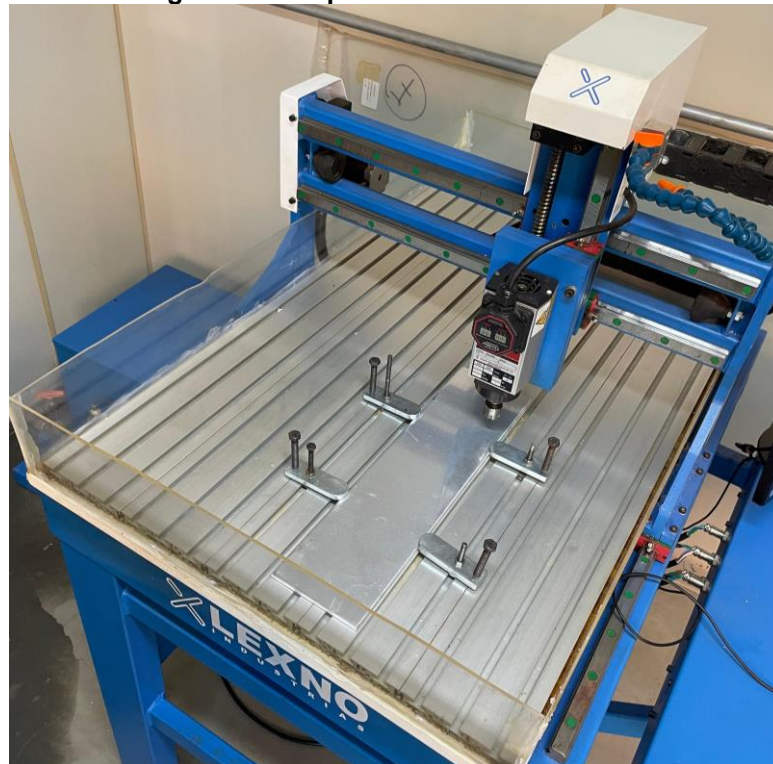
Figura 7 – Pisseta graduada com tampa azul bico curvo



Fonte: (Autoria própria, 2024).

4.3.4 Materiais de Teste

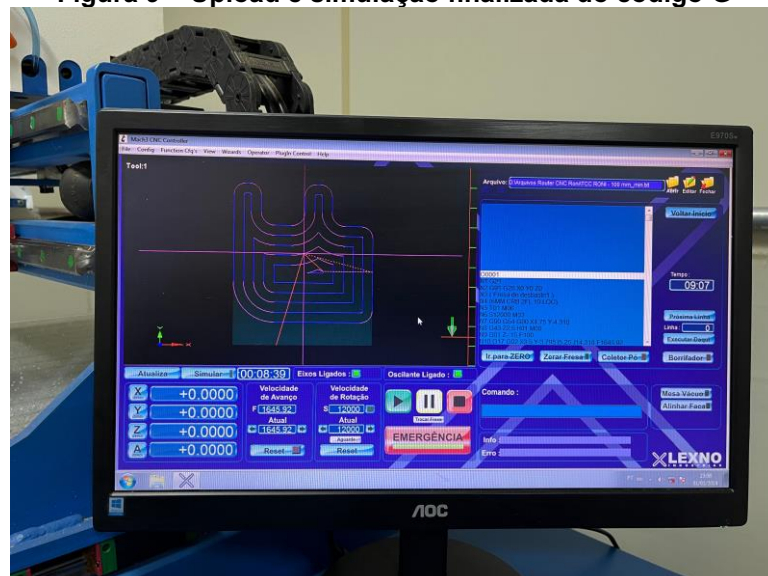
A Figura 8 demonstra a chapa de 6mm de alumínio 6011 que foi utilizada para realização dos ensaios de fresamento. A escolha dessa liga se deve à sua ampla utilização na indústria metalúrgica e às suas características distintas, que proporcionam um bom comparativo de desempenho do fluido de corte.

Figura 8 – Chapa de 6mm alumínio 6011

Fonte: (Autoria própria, 2024).

4.3.5 Software de Controle

Foi realizado o Upload e simulação do código G, cujo programa CNC foi desenvolvido utilizando software de CAD/CAM, garantindo a precisão dos trajetos de fresamento. Os códigos G gerados foram carregados na router CNC para execução dos ensaios.

Figura 9 – Upload e simulação finalizada do código G

Fonte: (Autoria própria, 2024).

Durante os ensaios, foram monitorados em tempo real parâmetros como velocidade de rotação, avanço da ferramenta e temperatura da zona de corte. Esse monitoramento foi feito através de sensores integrados ao sistema de controle da CNC.

Com a montagem do banco de ensaios concluída, todos os componentes e sistemas foram testados para garantir seu correto funcionamento.

A configuração estabelecida permitiu realizar os ensaios de fresamento das ligas de alumínio 6011 utilizando o fluido de corte de origem vegetal, proporcionando dados precisos e confiáveis para a avaliação do desempenho do fluido.

4.4 Parâmetros de Usinagem

Os parâmetros de usinagem são essenciais para garantir a qualidade e eficiência do processo de fresamento das ligas de alumínio 6011. Nesta seção, é detalhado os parâmetros de corte utilizados nos ensaios, incluindo a velocidade de corte, avanço por dente, profundidade de corte, e outros aspectos críticos. Esses parâmetros foram cuidadosamente selecionados com base em recomendações da literatura, especificações do fabricante das ferramentas, e características dos materiais a serem usinados.

4.4.1 Parâmetros de Corte

Os principais parâmetros de usinagem definidos para os ensaios são apresentados no Quadro 1.

Quadro 1 – Parâmetros de Usinagem

Parâmetro	Valor	Descrição
Velocidade de Corte (V_c)	150 mm/min	Velocidade linear na periferia da fresa. Determinada com base na recomendação do fabricante da ferramenta e nas propriedades do material.
Avanço por Dente (f_z)	0,1 mm/dente	Distância que a ferramenta avança por dente a cada rotação. Escolhida para garantir um bom acabamento superficial e minimizar o desgaste.
Profundidade de Corte (a_p)	2 mm	Profundidade de material removida por passagem da fresa. Definida para balancear a remoção de material e a durabilidade da ferramenta.
Avanço da Mesa (v_f)	300 mm/min	Velocidade de avanço da mesa, calculada com base no número de dentes da fresa e no avanço por dente.
Número de Dentes da Fresa (z)	4	Quantidade de gumes cortantes na fresa, influenciando diretamente no avanço por dente e na taxa de remoção de material.
Refrigeração	Fluido de corte vegetal	Utilização de um fluido de corte de origem vegetal para lubrificação e refrigeração durante o processo de usinagem.
Temperatura de Corte (T)	Monitorada em tempo real	A temperatura da zona de corte será monitorada para garantir que não haja superaquecimento, evitando danos à ferramenta e à peça.

Fonte: (Autoria própria, 2024).

4.4.2 Justificativa para a Seleção dos Parâmetros

A velocidade de corte foi selecionada com base nas propriedades das ligas de alumínio 6011, visando otimizar a eficiência do corte e a durabilidade da ferramenta. A escolha de 150 m/min é adequada para garantir um bom balanço entre produtividade e desgaste da ferramenta.

O avanço por dente de 0,1 mm foi escolhido para proporcionar um acabamento superficial de qualidade e minimizar a ocorrência de rebarbas. Este valor é compatível com as capacidades da fresa de 6 mm e os materiais usinados.

A profundidade de corte de 3 mm foi definida para permitir a remoção eficiente de material sem comprometer a estabilidade do processo. Este valor ajuda a manter um bom controle sobre as forças de corte e o desgaste da ferramenta.

A velocidade de avanço máxima de 300 mm/min foi calculada considerando o avanço por dente e o número de dentes da fresa, garantindo uma taxa de remoção de material consistente e eficiente.

A escolha de uma fresa com 4 dentes é adequada para a aplicação, permitindo um avanço eficiente e uma boa qualidade de superfície. A utilização de um fluido de corte de origem vegetal visa minimizar o impacto ambiental e proporcionar uma lubrificação eficaz, reduzindo o atrito e a geração de calor.

A monitorização contínua da temperatura de corte é crucial para evitar superaquecimento, o que poderia levar a falhas na ferramenta e à degradação da qualidade da peça usinada.

4.4.3 Procedimentos de Usinagem

Antes do início dos ensaios, todos os parâmetros de corte foram programados na router CNC, garantindo que a máquina operasse dentro das condições especificadas.

Os ensaios foram conduzidos seguindo um plano de corte pré-definido, com monitoramento contínuo das condições de corte, temperatura e qualidade do acabamento superficial.

Durante os ensaios, foram coletados dados sobre o desgaste da ferramenta, a qualidade da superfície usinada, a formação de rebarbas e a eficiência do fluido de corte. Esses dados foram analisados para avaliar o desempenho do fluido de corte de origem vegetal em comparação com os fluidos convencionais.

Esta abordagem detalhada dos parâmetros de usinagem garante a obtenção de resultados precisos e confiáveis, permitindo uma avaliação abrangente da eficácia do fluido de corte de origem vegetal em processos de fresamento das ligas de alumínio 6011.

4.5 Técnicas de Avaliação do Fluido de Corte

Os parâmetros de usinagem são essenciais para garantir a qualidade e eficiência do processo. A avaliação do desempenho do fluido de corte de origem vegetal foi realizada por meio de uma série de ensaios experimentais. As técnicas de avaliação empregadas visam medir e comparar diversos parâmetros de usinagem e qualidade do produto final, utilizando métodos estatísticos para garantir a robustez e

a confiabilidade dos resultados. A seguir, detalham-se as técnicas de avaliação adotadas, as alterações de configurações para comparação, e a quantidade de peças fresadas.

4.5.1 Avaliação do Desgaste da Ferramenta

Utilizou-se um microscópio óptico para medir o desgaste de flanco máximo (VB_{máx}) em intervalos regulares. O desgaste foi registrado após cada 10 minutos de usinagem, ou ao final de cada peça, o que ocorresse primeiro. A análise das imagens dos gumes de corte foi capturada e analisada para avaliar a extensão e os tipos de desgaste, como caracterização, lascamento e desgaste abrasivo.

4.5.2 Qualidade da Superfície Usinada

As peças usinadas foram inspecionadas visualmente para identificar defeitos superficiais, como rebarbas e marcas de ferramenta.

4.5.3 Análise dos Cavacos

Os cavacos gerados durante os ensaios foram coletados e analisados quanto ao formato, comprimento e cor. Essas características fornecem informações sobre a eficiência da usinagem e a interação entre a ferramenta e o material.

4.5.4 Eficiência da Refrigeração e Lubrificação

A temperatura da zona de corte foi monitorada utilizando um termômetro a laser infravermelho digital com a emissividade definida em 0,1. A eficácia do fluido de corte em manter a temperatura dentro de limites seguros foi avaliada. A eficiência da lubrificação foi inferida pela análise da superfície usinada e pelo desgaste da ferramenta.

4.5.5 Análise Estatística

Utilizou-se um planejamento fatorial 2^k para estudar o efeito de diferentes níveis de variáveis independentes, como tipo de fluido (vegetal vs. convencional), velocidade de corte, e avanço por dente.

A ANOVA foi empregada para determinar a significância estatística das variáveis estudadas e suas interações. Essa análise ajudou a identificar quais fatores

e combinações de fatores têm maior impacto no desempenho do fluido de corte. Realizaram-se testes de hipóteses para comparar os resultados entre o fluido de corte vegetal e os fluidos convencionais, garantindo que as conclusões fossem estatisticamente significativas.

4.5.6 Alterações de Configurações para Comparação

Para uma avaliação abrangente, diferentes configurações de usinagem foram testadas. Testou-se a velocidade de corte de 150 m/min a 300 m/min, com 50 mm/min de variação, sendo duas usinagens equivalentes para cada variação, foi utilizado valores de 0,1 mm/dente para o avanço por dente e profundidade de corte de 3 mm foram testadas.

4.5.7 Quantidade de Peças a Serem Fresadas

Foram fresadas um total de 4 peças de cada velocidade de corte, na liga de alumínio 6011 sob cada configuração de usinagem, totalizando 8 peças para cada tipo de fluido de corte (vegetal e convencional). Este número foi escolhido para garantir a repetibilidade e a confiabilidade dos resultados.

Tabela 3 – Configurações de Usinagem.

Configuração	Velocidade de Corte (Vc)	Avanço por Dente (fz)	Profundidade de Corte (ap)	Fluido de Corte
1	150 mm/min	0,1 mm/dente	3 mm	Vegetal
2	150 mm/min	0,1 mm/dente	3 mm	Convencional
3	150 mm/min	0,1 mm/dente	3 mm	Vegetal
4	150 mm/min	0,1 mm/dente	3 mm	Convencional
5	200 mm/min	0,1 mm/dente	3 mm	Vegetal
6	200 mm/min	0,1 mm/dente	3 mm	Convencional
7	200 mm/min	0,1 mm/dente	3 mm	Vegetal
8	200 mm/min	0,1 mm/dente	3 mm	Convencional
9	250 mm/min	0,1 mm/dente	3 mm	Vegetal
10	250 mm/min	0,1 mm/dente	3 mm	Convencional
11	250 mm/min	0,1 mm/dente	3 mm	Vegetal
12	250 mm/min	0,1 mm/dente	3 mm	Convencional
13	300 mm/min	0,1 mm/dente	3 mm	Vegetal
14	300 mm/min	0,1 mm/dente	3 mm	Convencional
15	300 mm/min	0,1 mm/dente	3 mm	Vegetal
16	300 mm/min	0,1 mm/dente	3 mm	Convencional

Fonte: (Autoria Própria, 2024).

Cada configuração foi repetida para garantir a precisão dos dados, e os resultados foram analisados estatisticamente para identificar tendências e determinar a eficácia relativa dos fluidos de corte. Essas técnicas de avaliação forneceram uma visão detalhada do desempenho do fluido de corte de origem vegetal, permitindo uma comparação crítica com os fluidos de corte convencionais e contribuindo para a adoção de práticas mais sustentáveis na indústria metalúrgica.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, será apresentado e discutido os resultados obtidos a partir dos ensaios experimentais realizados com o fluido de corte de origem vegetal e os fluidos de corte convencionais. Os resultados foram analisados com base nos parâmetros de desempenho estabelecidos na metodologia, incluindo o desgaste da ferramenta, a qualidade da superfície usinada, as forças de corte, as características dos cavacos, e a eficiência de lubrificação e refrigeração. A análise estatística foi utilizada para garantir a significância dos resultados e fornecer uma comparação robusta entre os diferentes fluidos de corte.

5.1 Procedimento de Usinagem e a Qualidade da Superfície

Nesta seção, será abordado e analisado os resultados obtidos a partir dos ensaios experimentais. Na Figura 10, temos as superfícies usinadas, organizadas em duas linhas idênticas. A disposição das amostras está distribuída nas colunas, sendo que na coluna 1 encontra-se a amostra 8, na coluna 2 a amostra 7, na coluna 3 a amostra 6, na coluna 4 a amostra 5, na coluna 5 a amostra 4, na coluna 6 a amostra 3, na coluna 7 a amostra 1 e na coluna 8 a amostra 2.

Figura 10 - Qualidade das superfícies usinadas.



Fonte: (Autoria própria, 2024).

A Figura 11 demonstra a tela do software Mach3 CNC Controller logo depois do upload do arquivo cod G, após o mesmo ter passado pelo processo de simulação do programa. O processo de simulação é essencial para identificar a ocorrência de possíveis erros de codificação e posteriormente para saber o tempo necessário para reproduzir a peça de acordo com os parâmetros utilizados.

Figura 11 - Simulação Software Mach3 CNC Controller



Fonte: (Autoria própria, 2024).

A Figura 12 – representa o processo de start no zeramento da peça, onde foi programado para iniciar o zeramento no centro da representação do desenho.

Figura 12 – Start processo de zeramento peça



Fonte: (Autoria própria, 2024).

Por fim, a Figura 13 e a Figura 14 as quais representam etapas do processo de usinagem e a geração dos cavacos pelo processo de fresamento.

Figura 13 – Processo de usinagem em desenvolvimento



Fonte: (Autoria própria, 2024).

Figura 14 – Presença do cavaco durante usinagem CNC



Fonte: (Autoria própria, 2024).

5.2 Características dos Cavacos

Nesta seção, serão apresentadas as características dos cavacos gerados a partir de cada usinagem. A Figura 15 representa os sacos plásticos preenchidos pelos respectivos cavacos identificados do processo de fresamento.

Figura 15 – Sacos plásticos com os respectivos cavacos identificados



Fonte: (Autoria própria, 2024).

5.2.1 Usinagem a 150 mm/min

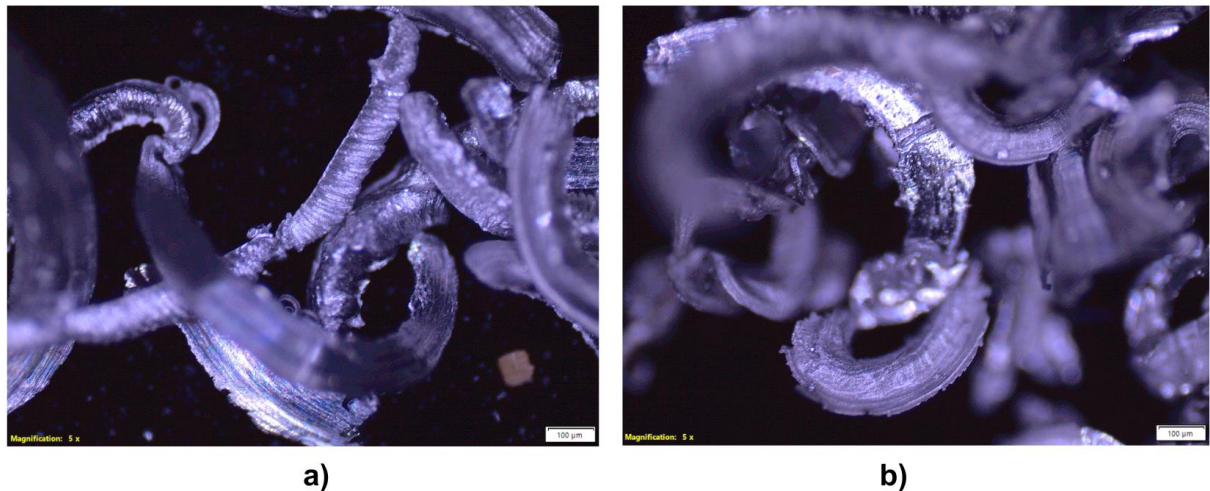
A usinagem a 150 mm/min foi escolhida como um dos parâmetros iniciais para avaliar o desempenho dos fluidos de corte utilizados. Este parâmetro permite observar como o fluido de corte interage com o material usinado, focando na formação de cavacos e no comportamento térmico durante o processo. A velocidade de 150 mm/min é ideal para proporcionar uma análise detalhada das diferenças de desempenho entre o fluido de corte convencional e o fluido de origem vegetal, especialmente em relação à qualidade dos cavacos formados.

Na primeira comparação Figura 16, a imagem (a) mostra cavacos formados com o fluido de corte convencional. Esses cavacos apresentam uma estrutura uniforme, com bordas suaves e uma textura regular, sugerindo uma boa capacidade

de lubrificação e dissipação de calor do fluido convencional. Em contraste, a imagem (b) do fluido vegetal revela cavacos com superfícies mais ásperas e uma menor uniformidade.

Essas diferenças indicam que o fluido vegetal pode ter uma capacidade de lubrificação inferior, resultando em maior atrito e formação de cavacos menos consistentes.

Figura 16 – Usinagem a 150 mm/min com: a) fluido convencional, b) fluido vegetal.

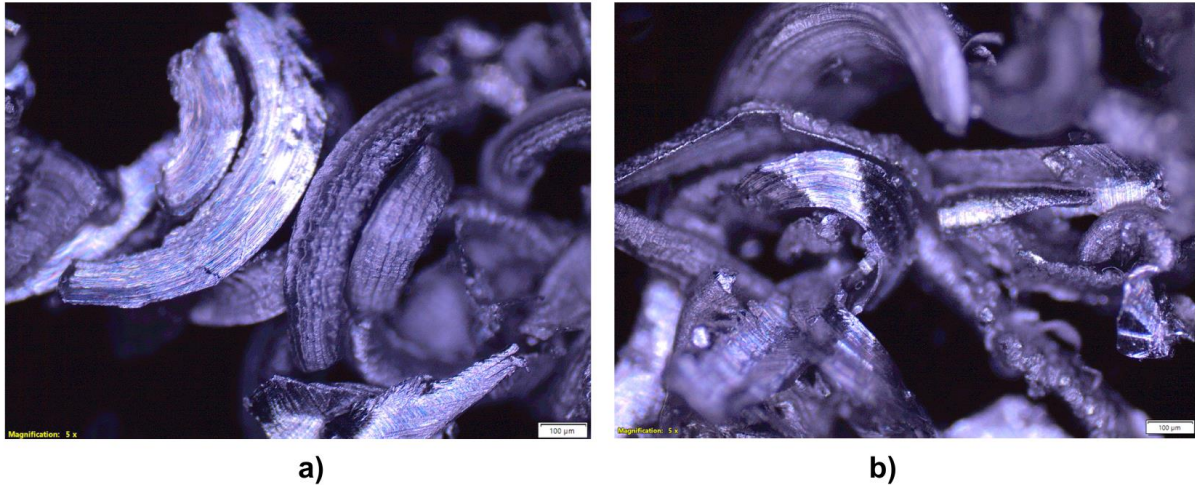


Fonte: (Autoria própria, 2024).

A segunda imagem (Figura 17) (a) reforça a eficácia do fluido convencional na formação de cavacos, mostrando novamente cavacos bem definidos, com uma curva suave e pouca variação na espessura.

A imagem (b), representando o fluido vegetal, exibe cavacos com uma aparência mais irregular, com evidências de pequenas ondulações e deformações. Isso sugere que o fluido vegetal, embora eficiente, pode não controlar a temperatura tão bem quanto o fluido convencional, resultando em uma usinagem ligeiramente mais áspera.

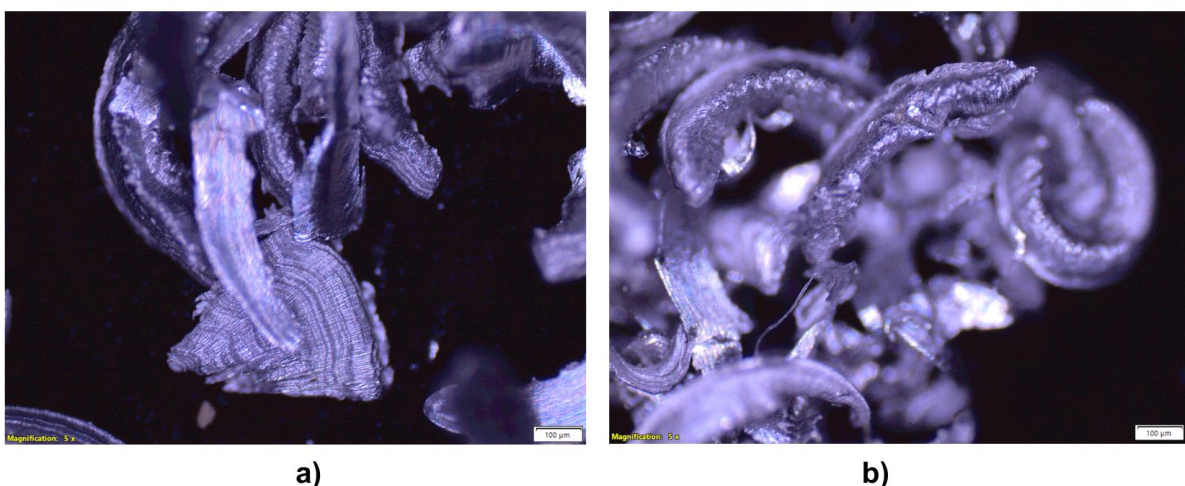
Figura 17 - Usinagem a 150 mm/min com: a) fluido convencional, b) fluido vegetal.



Fonte: (Autoria própria, 2024).

Na terceira imagem (Figura 18) (a), os cavacos gerados com o fluido convencional continuam a mostrar uma remoção de material estável, com uma forma helicoidal uniforme e sem deformações visíveis. Em comparação, a imagem (b) do fluido vegetal revela cavacos com uma formação mais quebradiça e fragmentada. Esses sinais podem indicar que o fluido vegetal, embora capaz de realizar a usinagem, pode não oferecer a mesma estabilidade térmica e mecânica que o fluido convencional, levando a um processo de corte menos controlado.

Figura 18 - Usinagem a 150 mm/min com: a) fluido convencional, b) fluido vegetal.

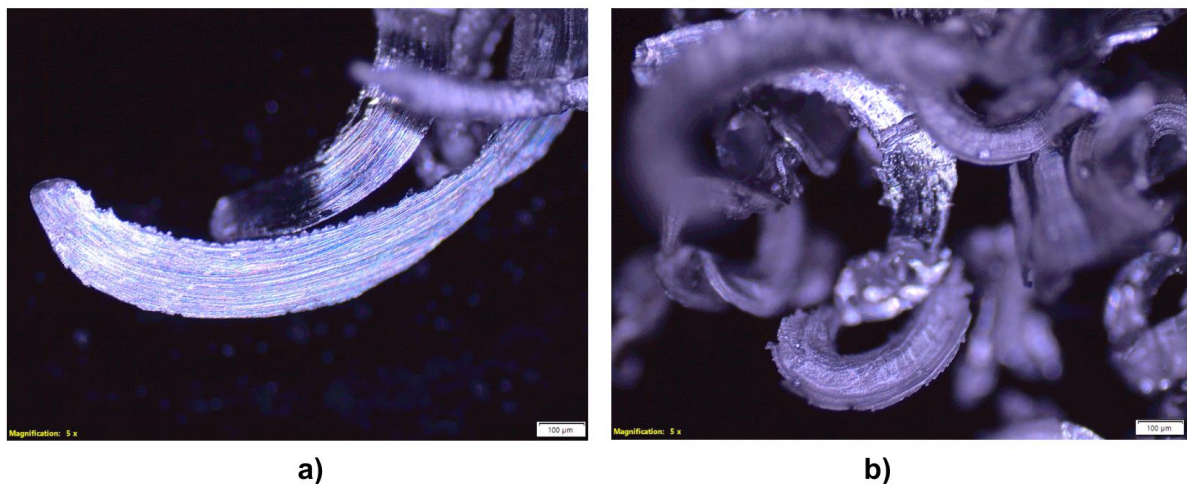


Fonte: (Autoria própria, 2024).

Por fim, na quarta imagem (Figura 19), (a), o fluido convencional demonstra sua superioridade ao produzir cavacos com uma textura suave e regular, evidenciando

uma remoção de material eficiente e bem controlada. Por outro lado, a imagem (b) do fluido vegetal mostra cavacos com bordas menos definidas e uma estrutura mais desordenada, possivelmente indicando uma menor capacidade de resfriamento e lubrificação durante a usinagem. A comparação final entre as duas imagens confirma que, enquanto o fluido vegetal apresenta um desempenho aceitável, ele pode não alcançar a mesma qualidade de usinagem que o fluido convencional nas condições testadas.

Figura 19 - Usinagem a 150 mm/min com: a) fluido convencional, b) fluido vegetal.



Fonte: (Autoria própria, 2024).

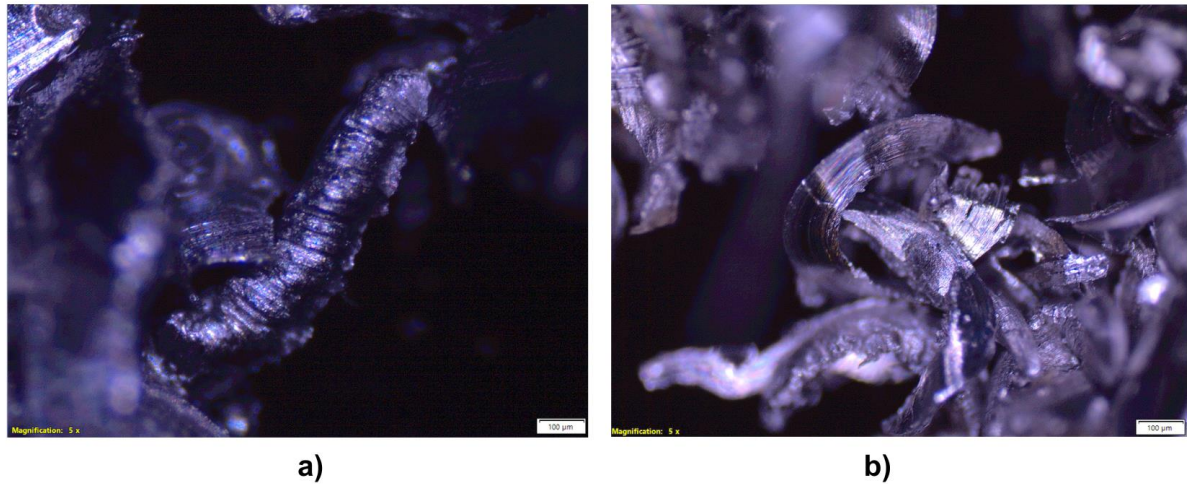
5.2.2 Usinagem a 200 mm/min

A usinagem a 200 mm/min foi realizada para avaliar como o aumento da velocidade de corte influencia o desempenho dos fluidos de corte, tanto convencional quanto vegetal. Este parâmetro mais elevado de velocidade permite observar as diferenças na formação de cavacos e a eficiência na dissipação de calor sob condições de corte mais agressivas. A análise comparativa entre os dois fluidos fornece *insights* sobre a capacidade de cada um em manter a integridade da ferramenta e a qualidade do material usinado sob maior demanda térmica e mecânica.

Na primeira imagem comparativa (Figura 20) a 200 mm/min, os cavacos formados com o fluido de corte convencional (a) mostram uma estrutura bem definida e contínua, com bordas suaves que indicam uma lubrificação eficaz e uma boa dissipação de calor. Esses cavacos sugerem que o fluido convencional conseguiu sustentar a performance da usinagem, mesmo com o aumento da velocidade. Em

contraste, a imagem (b) que representa o fluido vegetal exibe cavacos com uma textura mais rugosa e uma formação menos regular. Isso pode indicar que o fluido vegetal teve uma menor eficiência na lubrificação e no controle térmico, resultando em uma remoção de material menos controlada e com maior resistência.

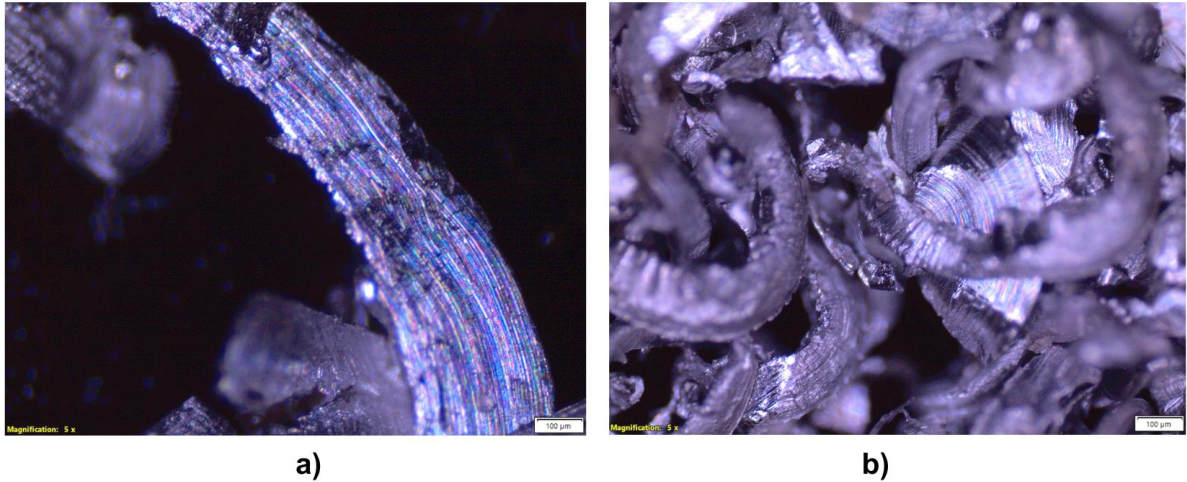
Figura 20 - Usinagem a 200 mm/min com: a) fluido convencional, b) fluido vegetal.



Fonte: (Autoria própria, 2024).

Na segunda imagem (Figura 21), (a), referente ao fluido convencional, os cavacos continuam a demonstrar uniformidade e consistência, evidenciando a capacidade do fluido convencional em manter uma alta qualidade de usinagem a 200 mm/min. Por outro lado, na imagem (b), os cavacos formados com o fluido vegetal mostram um aumento nas irregularidades, com superfícies mais ásperas e bordas menos definidas. Esses resultados indicam que o fluido vegetal pode não ter conseguido dissipar o calor de maneira tão eficaz quanto o fluido convencional, o que pode ter levado a uma usinagem menos estável e a uma qualidade inferior dos cavacos formados.

Figura 21 - Usinagem a 200 mm/min com: a) fluido convencional, b) fluido vegetal.



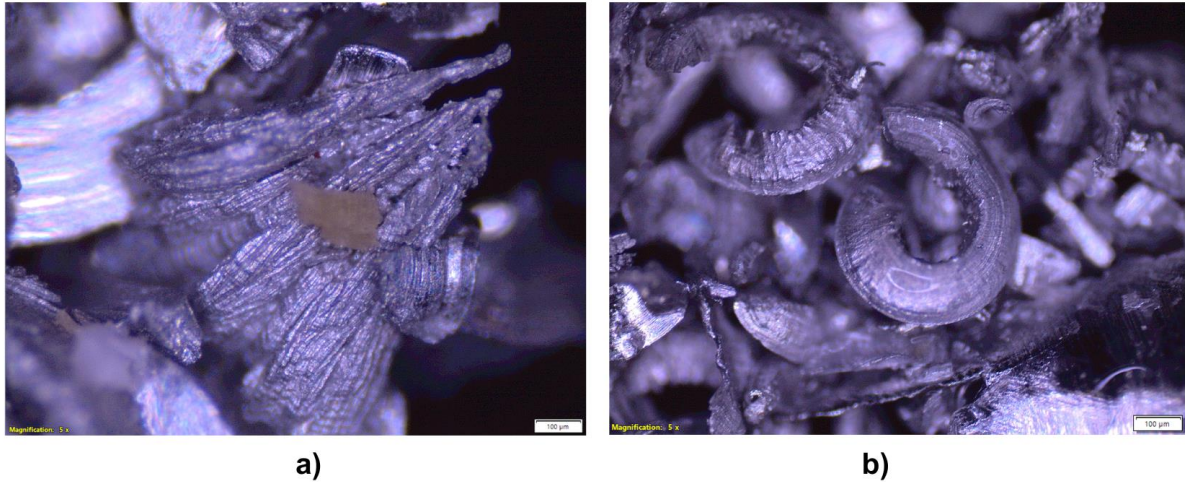
Fonte: (Autoria própria, 2024).

5.2.3 Usinagem a 250 mm/min

A usinagem a 250 mm/min representa um aumento significativo na velocidade de corte, o que testa ainda mais a capacidade dos fluidos de corte de manter a integridade da ferramenta e a qualidade do material usinado. Nesta velocidade, a dissipação eficiente do calor e a lubrificação adequada tornam-se ainda mais críticas para evitar danos à ferramenta e garantir a formação de cavacos de qualidade. A comparação entre os fluidos convencional e vegetal a esta velocidade é essencial para entender como cada fluido se comporta sob condições de corte mais extremas.

Na primeira imagem comparativa (Figura 22) a 250 mm/min, os cavacos formados com o fluido de corte convencional (a) mostram uma estrutura relativamente robusta, com uma superfície irregular que pode indicar o início de dificuldades na dissipação de calor devido à alta velocidade de usinagem. Entretanto, os cavacos ainda mantêm uma forma reconhecível e consistência, sugerindo que o fluido convencional ainda está proporcionando um nível aceitável de lubrificação. Em contraste, a imagem (b), que representa o fluido vegetal, exhibe cavacos significativamente mais deformados, com uma estrutura mais quebradiça e uma superfície menos uniforme. Esses sinais indicam que o fluido vegetal pode estar sofrendo com o aumento da velocidade, resultando em uma formação de cavacos menos controlada e mais suscetível a falhas térmicas.

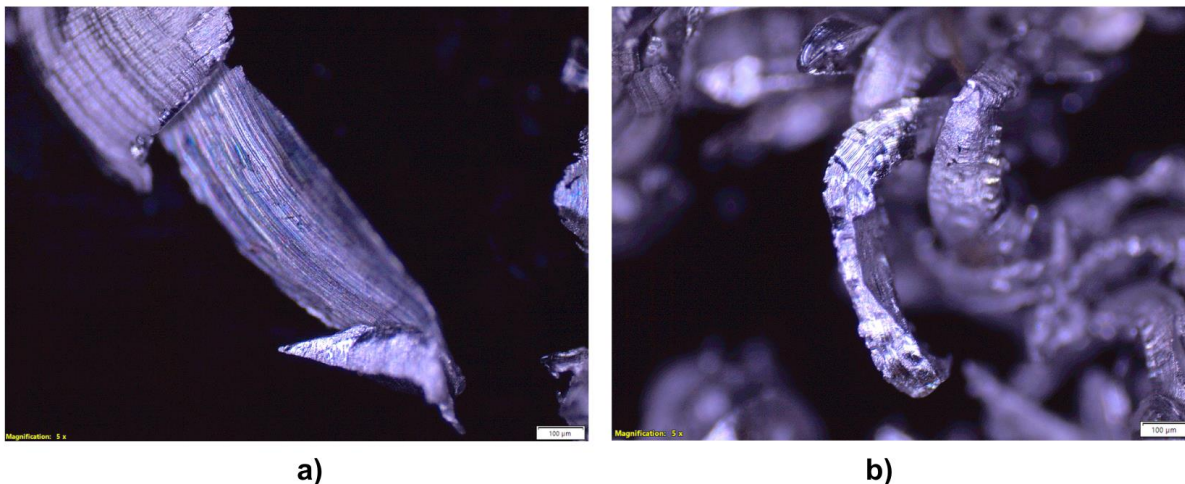
Figura 22 - Usinagem a 250 mm/min com: a) fluido convencional, b) fluido vegetal.



Fonte: (Autoria própria, 2024).

Na segunda imagem (Figura 23), (a), os cavacos formados com o fluido convencional continuam a mostrar uma forma razoavelmente estável, embora com algumas imperfeições, o que pode ser atribuído ao aumento da velocidade de corte. Mesmo assim, a estrutura geral dos cavacos sugere que o fluido convencional ainda é capaz de suportar a alta demanda térmica e mecânica da usinagem a 250 mm/min. Em comparação, a imagem (b) dos cavacos formados com o fluido vegetal revela uma fragmentação mais pronunciada, com cavacos que apresentam bordas irregulares e uma estrutura fragmentada. Esses resultados sugerem que o fluido vegetal não foi capaz de proporcionar a mesma qualidade de lubrificação e controle térmico que o fluido convencional, resultando em uma formação de cavacos menos eficiente e mais instável sob estas condições.

Figura 23 - Usinagem a 250 mm/min com: a) fluido convencional, b) fluido vegetal.



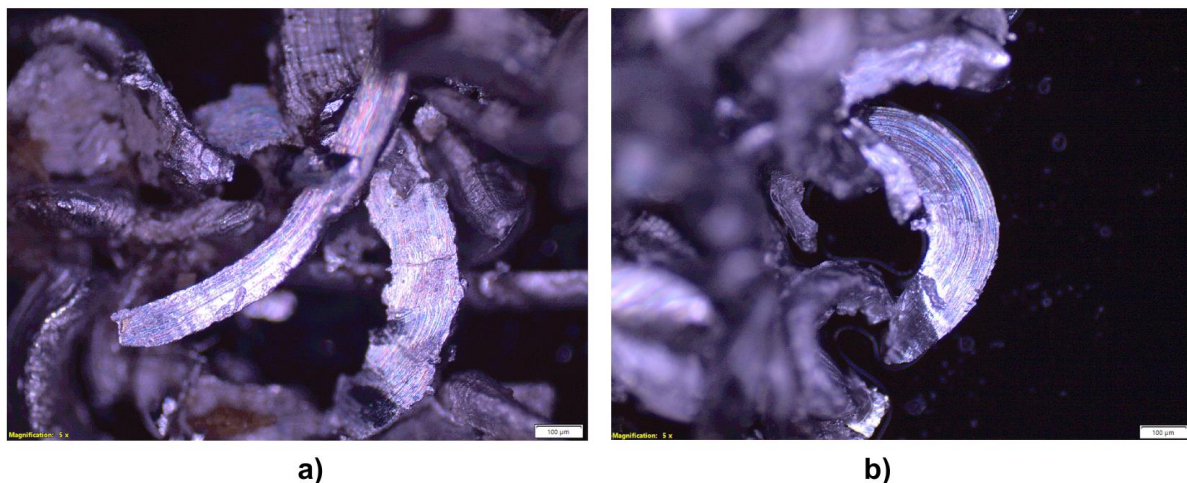
Fonte: (Autoria própria, 2024).

5.2.4 Usinagem a 300 mm/min

A usinagem a 300 mm/min representa o parâmetro de velocidade mais alto testado, colocando uma pressão ainda maior sobre os fluidos de corte para garantir uma usinagem eficiente e segura. Nesta velocidade, o desafio é manter a integridade da ferramenta e evitar a degradação do material usinado devido ao calor intenso gerado. A comparação entre o fluido convencional e o fluido vegetal a esta velocidade é fundamental para avaliar qual dos dois é mais eficaz em condições de corte extremas.

Na primeira imagem comparativa (Figura 24) a 300 mm/min, os cavacos formados com o fluido de corte convencional (a) apresentam uma forma relativamente estável, embora com sinais de irregularidades que indicam dificuldades em manter a lubrificação ideal e dissipar o calor em uma velocidade tão alta. Esses cavacos ainda mantêm uma integridade razoável, o que sugere que o fluido convencional conseguiu oferecer uma proteção mínima contra os efeitos adversos da alta velocidade. Em contrapartida, a imagem (b) do fluido vegetal mostra cavacos que são visivelmente mais desorganizados, com uma estrutura menos definida e sinais de fragmentação. Isso sugere que o fluido vegetal enfrentou dificuldades significativas em controlar o calor e manter a eficiência da lubrificação, resultando em uma remoção de material menos controlada.

Figura 24 - Usinagem a 300 mm/min com: a) fluido convencional, b) fluido vegetal.

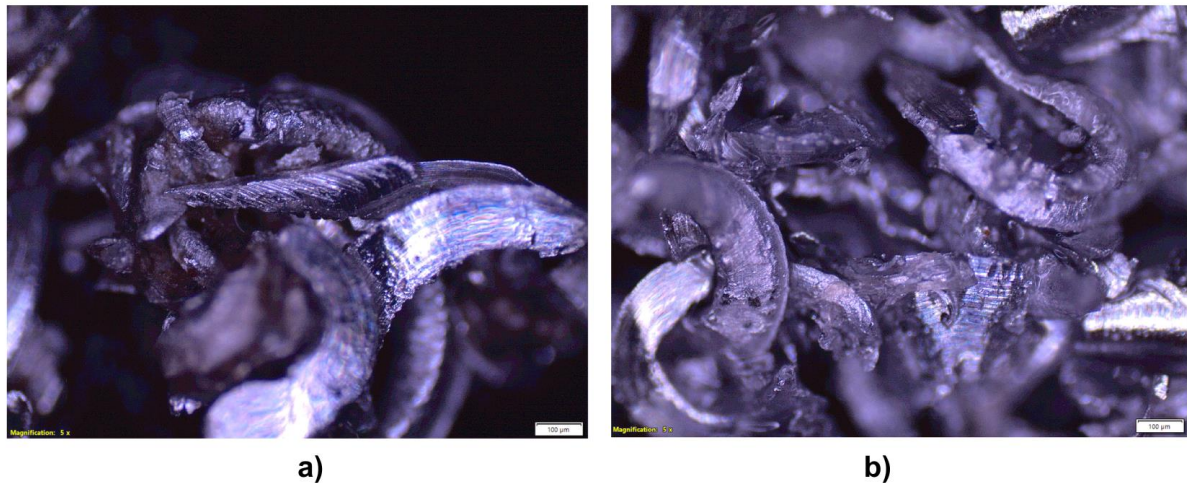


Fonte: (Autoria própria, 2024).

Na segunda imagem (Figura 25), (a), os cavacos formados com o fluido convencional continuam a mostrar uma forma que, apesar das imperfeições, ainda

retêm uma certa consistência estrutural. Este desempenho indica que, mesmo a 300 mm/min, o fluido convencional foi capaz de mitigar parte dos efeitos negativos da alta velocidade, mantendo a qualidade do corte em um nível aceitável. Em contraste, a imagem (b) dos cavacos formados com o fluido vegetal revela uma fragmentação mais pronunciada, com cavacos que apresentam bordas irregulares e uma textura mais desordenada. Esses resultados indicam que o fluido vegetal não foi capaz de sustentar a demanda térmica e mecânica imposta pela usinagem a 300 mm/min, levando a uma usinagem menos eficiente e a uma qualidade inferior dos cavacos formados.

Figura 25 - Usinagem a 300 mm/min com: a) fluido convencional, b) fluido vegetal.



Fonte: (Autoria própria, 2024).

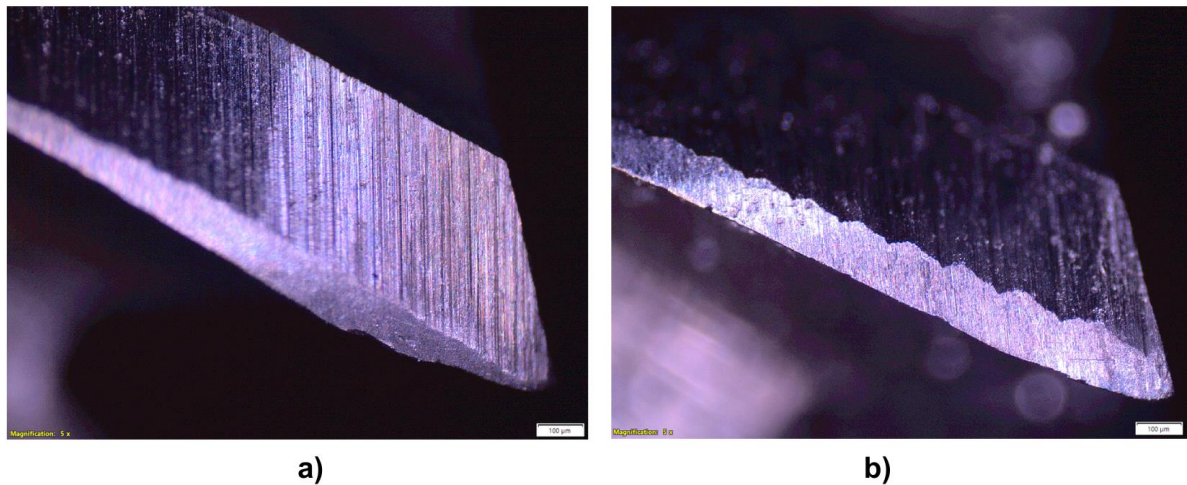
5.3 Desgaste da Ferramenta

A análise dos gumes das ferramentas após o processo de usinagem revela informações críticas sobre o desempenho dos fluidos de corte. Embora as análises dos cavacos tenham sugerido uma maior eficiência do fluido convencional, os resultados observados nos gumes das ferramentas indicam que o fluido vegetal proporcionou uma menor taxa de desgaste, mesmo sob condições de usinagem exigentes. Esta discrepância entre a formação de cavacos e o desgaste da ferramenta pode ser atribuída a diferentes mecanismos de interação entre o fluido de corte e a ferramenta ao longo do processo de usinagem.

Na primeira imagem (Figura 26), o gume da ferramenta usinada com o fluido convencional (a) exibe um desgaste notável, com marcas evidentes de desgaste ao

longo do gume de corte. Este desgaste sugere que, apesar de sua eficiência na formação de cavacos, o fluido convencional pode não ter proporcionado uma proteção suficiente à ferramenta, resultando em uma degradação significativa da borda de corte. Em contraste, o gume da ferramenta usinada com o fluido vegetal (b) mostra um desgaste consideravelmente menor, com um gume mais intacto e menos danificado. Isso sugere que o fluido vegetal, embora menos eficaz na formação de cavacos, conseguiu oferecer uma melhor proteção contra o desgaste da ferramenta, prolongando sua vida útil.

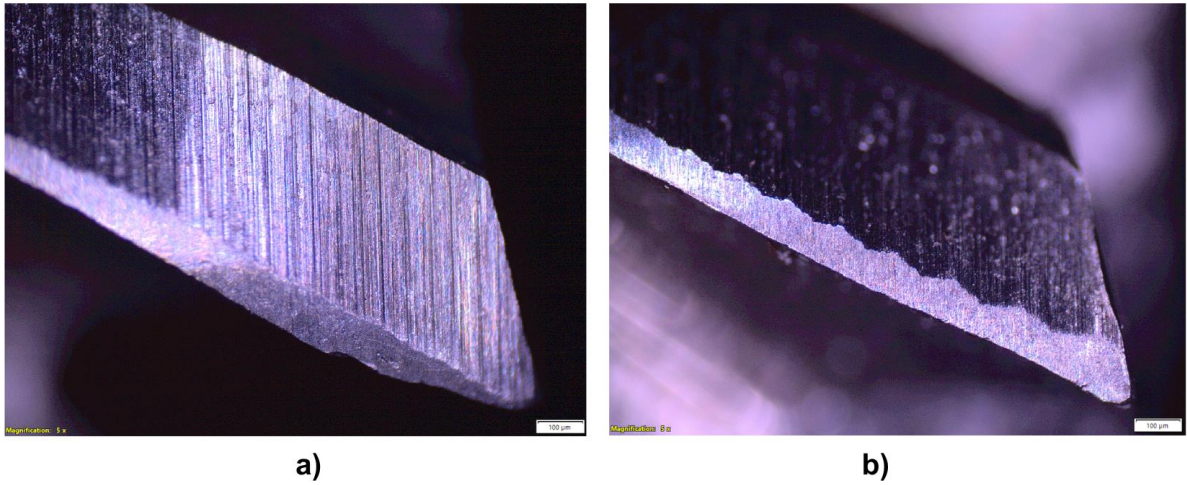
Figura 26 - Gume 1 da fresa na usinagem com: a) fluido convencional, b) fluido vegetal.



Fonte: (Autoria própria, 2024).

Na segunda imagem (Figura 27), o gume da ferramenta usinada com o fluido convencional (a) apresenta um padrão de desgaste semelhante ao observado anteriormente, com sinais claros de desgaste progressivo ao longo do gume. Essas marcas indicam uma redução na eficiência do corte, que pode ser atribuída ao aquecimento excessivo ou à fricção aumentada devido à falha do fluido em proteger adequadamente a ferramenta. Por outro lado, o gume da ferramenta usinada com o fluido vegetal (b) continua a mostrar um desgaste menor, com uma borda mais bem preservada. Este resultado reforça a observação de que o fluido vegetal, apesar de suas limitações na qualidade dos cavacos, foi mais eficaz em reduzir o desgaste da ferramenta.

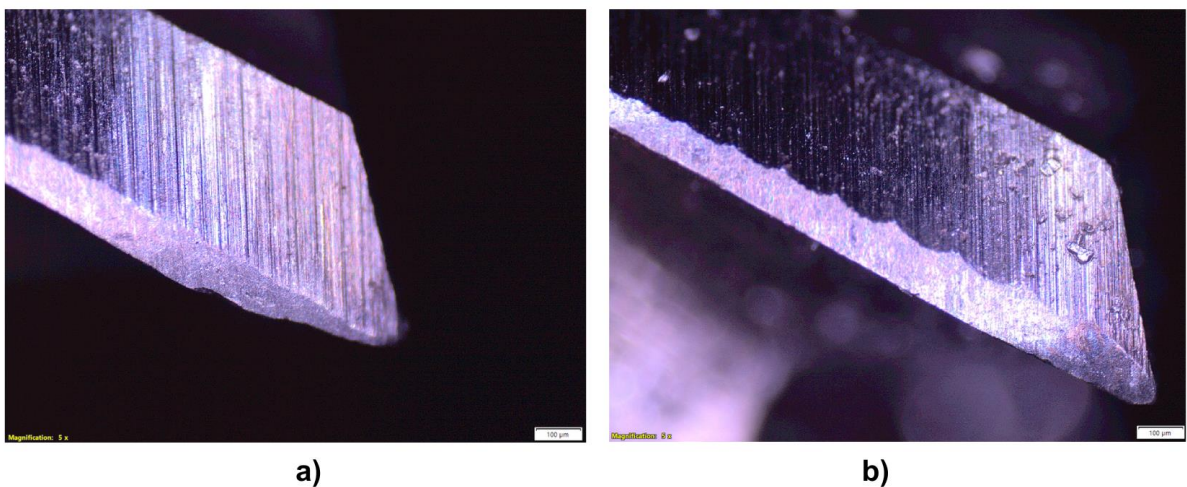
Figura 27 - Gume 2 da fresa na usinagem com: a) fluido convencional, b) fluido vegetal.



Fonte: (Autoria própria, 2024).

Na terceira imagem (Figura 28), a ferramenta usinada com o fluido convencional (a) exibe um desgaste ainda mais pronunciado, com o gume de corte visivelmente comprometido. A degradação da borda sugere que o fluido convencional pode ter sido menos eficaz em manter a temperatura de corte sob controle, levando a um aumento no desgaste abrasivo. Em contraste, o gume da ferramenta usinada com o fluido vegetal (b) mostra uma menor quantidade de desgaste, com a borda de corte permanecendo relativamente nítida. Isso aponta para uma maior eficácia do fluido vegetal em reduzir o atrito e proteger a ferramenta ao longo do processo de usinagem.

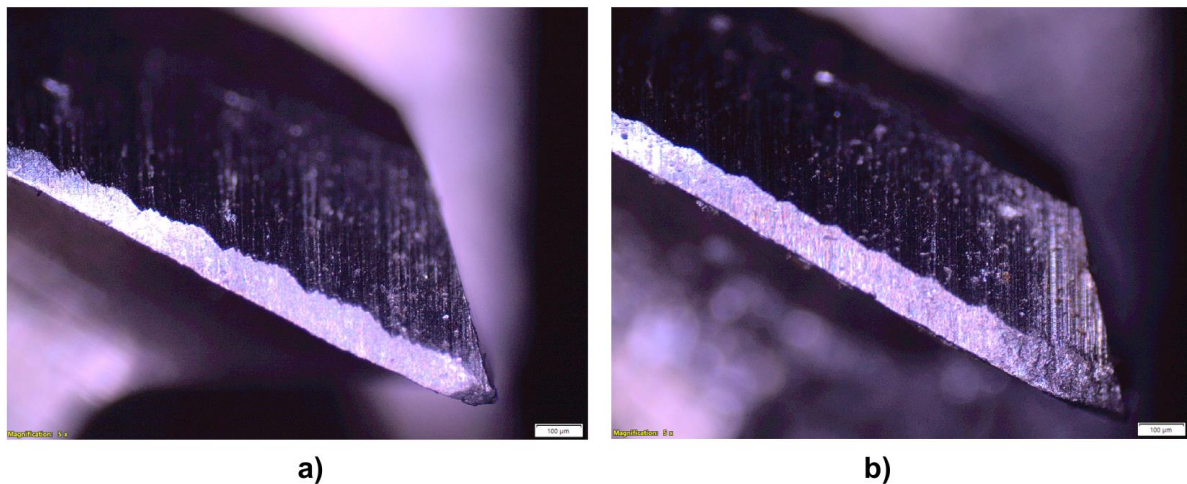
Figura 28 - Gume 3 da fresa na usinagem com: a) fluido convencional, b) fluido vegetal.



Fonte: (Autoria própria, 2024).

Na quarta e última imagem (Figura 29), o padrão de desgaste do gume usinado com o fluido convencional (a) é consistente com os observados anteriormente, mostrando uma borda significativamente desgastada e comprometida. Este desgaste contínuo ao longo das imagens reforça a hipótese de que o fluido convencional, embora eficaz na remoção de material, falhou em proteger adequadamente a ferramenta contra o desgaste. Por outro lado, o gume usinado com o fluido vegetal (b) novamente mostra um desgaste reduzido, com a borda de corte permanecendo menos afetada. Este resultado final sugere que, apesar das aparentes deficiências na formação de cavacos, o fluido vegetal ofereceu uma proteção superior à ferramenta, resultando em um desgaste menor e potencialmente prolongando a vida útil da ferramenta.

Figura 29 - Gume 4 da fresa na usinagem com: a) fluido convencional, b) fluido vegetal.



Fonte: (Autoria própria, 2024).

Em geral, a análise das imagens dos gumes da Fresa 1 utilizada com fluido convencional revela um desgaste abrasivo significativo e consistente em todos os gumes de corte, indicando um alto nível de atrito e possivelmente altas temperaturas durante a usinagem.

5.4 Temperaturas de Usinagem

A análise das temperaturas durante a usinagem revelou que, embora tenha havido variações entre as amostras usinadas com ambos os fluidos de corte, essas diferenças foram relativamente sutis, mesmo com o aumento das velocidades de corte.

A Tabela 4 representa as temperaturas durante o processo de usinagem utilizando o fluido de corte convencional, logo a Tabela 5 tem os valores obtidos durante a usinagem com o fluido de corte vegetal.

Observou-se que as variações (desvio médio padrão) de temperaturas registradas foram ligeiramente maiores nas configurações com o fluido vegetal, especialmente nas velocidades de corte mais altas, o que sugere uma capacidade de dissipação de calor um pouco inferior em comparação com o fluido convencional. No entanto, essa variação foi considerada baixa e dentro de uma faixa controlada, o que indica que ambos os fluidos conseguiram manter a integridade térmica do processo.

A emissividade da pistola infravermelho foi configurada corretamente para medir a temperatura da chapa de alumínio, com o valor ajustado em 0,1, garantindo leituras mais precisas e consistentes ao longo dos experimentos.

Tabela 4 – Temperaturas durante usinagem fluido de corte convencional.

Configuração	Velocidade de Corte (Vc)	Fluido de Corte	Temperatura (°C ± 0,1)	Desvio médio padrão
1	150 mm/min	Convencional	$T_i = 23,3$	$\sigma_{m,c} = 0,1875$
			$T_f = 23,5$	
2	150 mm/min	Convencional	$T_i = 23,1$	
			$T_f = 23,2$	
3	200 mm/min	Convencional	$T_i = 23,0$	
			$T_f = 23,1$	
4	200 mm/min	Convencional	$T_i = 22,9$	
			$T_f = 23,1$	
5	250 mm/min	Convencional	$T_i = 22,7$	
			$T_f = 23,0$	
6	250 mm/min	Convencional	$T_i = 22,7$	
			$T_f = 22,9$	
7	300 mm/min	Convencional	$T_i = 22,6$	
			$T_f = 22,8$	
8	300 mm/min	Convencional	$T_i = 22,5$	
			$T_f = 22,7$	

Fonte: (Autoria própria, 2024).

Tabela 5 – Temperaturas durante usinagem fluido de corte vegetal.

Configuração	Velocidade de Corte (Vc)	Fluido de Corte	Temperatura (°C ± 0,1)	Desvio médio padrão
1	150 mm/min	Vegetal	$T_i = 24,1$	$\sigma_{m,v} = 0,2$
			$T_f = 24,3$	
2	150 mm/min	Vegetal	$T_i = 24,5$	
			$T_f = 24,7$	
3	200 mm/min	Vegetal	$T_i = 24,3$	
			$T_f = 24,5$	
4	200 mm/min	Vegetal	$T_i = 24,6$	
			$T_f = 24,7$	
5	250 mm/min	Vegetal	$T_i = 24,4$	
			$T_f = 24,6$	
6	250 mm/min	Vegetal	$T_i = 24,4$	
			$T_f = 24,7$	
7	300 mm/min	Vegetal	$T_i = 24,5$	
			$T_f = 24,7$	
8	300 mm/min	Vegetal	$T_i = 24,6$	
			$T_f = 24,8$	

Fonte: (Autoria própria, 2024).

6 CONCLUSÃO

A análise de desempenho do fluido de corte de origem vegetal, composto por 10% de óleo de moringa e tensoativos e 90% de água, aplicado em processos de usinagem de ligas de alumínio 6011, revelou resultados mistos, porém promissores. Em termos de formação de cavacos, o fluido convencional demonstrou uma performance superior, produzindo cavacos mais uniformes e com menos fragmentações. Em contraste, o fluido vegetal apresentou cavacos com maior irregularidade, sugerindo uma menor eficiência na lubrificação e controle térmico durante a usinagem.

No entanto, a análise dos gumes das ferramentas indicou uma vantagem significativa do fluido vegetal, que proporcionou um menor desgaste das ferramentas em comparação com o fluido convencional. Este resultado sugere que, apesar das limitações observadas na qualidade dos cavacos, o fluido vegetal conseguiu oferecer uma proteção mais eficaz às ferramentas, potencialmente prolongando sua vida útil e reduzindo a necessidade de substituições frequentes.

A análise das temperaturas durante a usinagem mostrou que as diferenças entre os fluidos foram sutis e permaneceram dentro de uma faixa aceitável. As temperaturas registradas foram ligeiramente maiores com o fluido vegetal, especialmente em velocidades de corte mais elevadas, mas ainda assim se mantiveram controladas. É importante ressaltar que o local de usinagem não era climatizado, o que pode ter introduzido variações ambientais nas medições de temperatura.

Em suma, o fluido de corte de origem vegetal demonstrou um potencial significativo como uma alternativa mais sustentável aos fluidos de corte convencionais, especialmente no que se refere à preservação das ferramentas. Contudo, para uma substituição eficaz, é necessário continuar investigando formas de otimizar a formulação do fluido vegetal, visando melhorar a qualidade dos cavacos e a eficiência geral da usinagem. Além disso, futuras pesquisas deveriam explorar a influência de diferentes aditivos e técnicas de aplicação, bem como avaliar o desempenho do fluido em uma variedade maior de materiais e condições de usinagem. A continuidade desses estudos será crucial para a implementação segura e eficiente desses fluidos vegetais na indústria, contribuindo para práticas mais sustentáveis e ecologicamente responsáveis.

REFERÊNCIAS

- AGWU, U. J.; BESSANT, J. Sustainable Business Models: A Systematic Review of Approaches and Challenges in Manufacturing. **Journal of Contemporary Administration**, v. 25, 2021.
- ANDERSON, J. R. **Fluidos de Corte na Usinagem: Seleção e Aplicação**. Editora ABC, 2017.
- ARAÚJO, R. A., & SILVA, D. C. (2019). **Fluidos de corte: uma revisão sobre os tipos, aplicações, características e impactos ambientais**. Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental, 23(2), 458-467.
- BOA SORTE, Rafael Tanganini. **Influência do fluido de corte na usinagem de polímeros**. 2020. 59p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2020.
- BOOKES, J. **Biological and chemical hazards in water-mix metalworking fluids and mists**. Defesa de Doutorado pela universidade Sheffield Hallam, 2017. Disponível em: <https://shura.shu.ac.uk/21507/> . Acesso em 09 de Agosto 2023.
- CARVALHO, C. F. **Estudo da viabilidade de emulsões a base de óleos vegetais para uso em processos de usinagem de liga de alumínio 6011**. 2023. Online. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/32492/1/estudodaviabilidadedeemulsoes.pdf> Acesso em: 03 de Agosto de 2023.
- COÊLHO, J. D. **Algodão: produção e mercados**. Fortaleza: Banco do Nordeste do Brasil, ano 6, n.166 2021.
- FARAHANI, A., TOHIDI, H. **Integrated optimization of quality and maintenance: A literature review, Computers & Industrial Engineering**. Volume 151, 2021, Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106924>. Acesso em: 12 de Agosto de 2023.
- FARIA, P. et al. **Characterization of Lubricating Oils by Comprehensive Two-Dimensional Liquid Chromatography Coupled to Mass Spectrometry**. Separations, 2019.
- FERREIRA, J. A. et al. (2017). **Estudo da viabilidade do uso de fluidos de corte de origem vegetal**. Caderno Técnico de Metal Mecânica, 1(1), 29-42.
- FUJITA, M. et al. (2008). **Evaluation of cutting fluid performance based on chip discharge characteristics**. Journal of Materials Processing Technology, vol. 204, n. 1-3, pp. 151-157.
- GARCIA, A. et al. **Thermal Stability of Cutting Fluids Based on Vegetable Oils: An Experimental Investigation**. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2020.
- GOMES, P., SANTOS, M., OLIVEIRA, R. (2020). **Performance evaluation of vegetable oil-based cutting fluids in turning operations**. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 107(5-6), 2575-2590.

- HUANG, X. et al. **Rheological Behavior and Lubrication Performance of Vegetable-Based Metalworking Fluids**. Industrial Lubrication and Tribology, 2021.
- JOHNSON, P. **Lubrication and Cooling in Metal Cutting**. Springer, 2019.
- JÚNIOR, J. R. N. (2012). **Fluidos de corte: Estudo de caso em indústria moveleira**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina.
- KIM, S. et al. **Measurement of the Viscosity of Cutting Fluids under Extreme Pressure**. Industrial Lubrication and Tribology, 2017.
- LEE, S. **Environmental Impact of Cutting Fluids: Vegetable Oil-Based Cutting Fluids vs. Conventional Cutting Fluids**. Procedia CIRP, 2021.
- LIU, Z. et al. **The Impact of Cutting Fluid pH on the Tribological Behavior of a Vegetable-Based Oil**. Lubricants, 2019.
- LISBOA, F.; MORAES, J.; HIRASHITA, M. **FLUIDOS DE CORTE: UMA ABORDAGEM GERAL E NOVAS TENDÊNCIAS**. Xxxiii encontro nacional de engenharia de producao. Salvador, BA, Brasil. 2013 Disponível em: https://abepro.org.br/biblioteca/enegep2013_TN_STO_185_056_23095.pdf Acesso em: 12 de Agosto de 2023.
- KURODA M., **O mundo da usinagem**, Sandvik do Brasil, 2006. Online. Disponível em: <http://www.omundodausinagem.com.br/pdf/27.pdf>. Acesso em 06 Setembro 2023.
- MACHADO, Á. R., & SILVA, C. J. (2020). **Estudo comparativo do desempenho de fluidos de corte convencionais e biodegradáveis em usinagem de aço ABNT 1045**. Revista Tecnológica-ES, 4(2), 13-22.
- MAIA, E. G.; NUNES, T. D.; GAMA, A. M. A.; SILVA, J. L. P. **Métodos de investigação científica para a área de saúde**. São Paulo: Editora Atheneu, 2011.
- MIYOSHI, K. et al. (2007). **Eco-friendly vegetable oil-based cutting fluid**. Tribology International, vol. 40, no. 5, pp. 773-780.
- MOLLA, S. et al (2022). **Advances in the Application of Vegetable-Oil-Based Cutting Fluids to Sustainable Machining Operations**. MDPI Lubricants, 10(4), 69. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2075-4442/10/4/69> Acesso em: 23 de Agosto de 2024.
- NGUYEN, N. T. et al. (2010). **Vegetable oil-based metalworking fluids for cutting and grinding**. Journal of Materials Processing Technology, vol. 210, n. 7, pp. 969-977.
- PORTNEY, K. E. **Sustainability**. MIT Press, 2015.
- SANTOS, E. et al. **Vegetable Oils and Their Derivatives as Alternative Lubricants for Sustainable Machining: A Review**. Lubricants, 2020.
- SANTOS, J.; CUNHA, R. **Estudo da possibilidade de aplicação de óleos de coco e de soja em substituição de fluidos emulsionáveis no torneamento do aço SAE 1045**. Universidade Federal Rural do Semi-árido. Revista Eletrônica de Engenharia

Elétrica e Engenharia Mecânica, 2022. Disponível em: <https://periodicos.ufersa.edu.br/r4em/article/download/10995/10970/69725> Acesso em: 14 de Agosto de 2023.

SILVA, D. D. et al. (2019). **Desenvolvimento de fluidos de corte para usinagem de metais de base vegetal**. Revista Máquinas e Metais, 57(642), 126-135.

SILVA, J. G., MARTINS, É. G., & SILVA, E. F. (2019). **Avaliação das propriedades físicas e químicas de fluidos de corte à base de óleos vegetais**. Revista brasileira de engenharia de produção, 5(1), 1-12.

SILVA, L., SOUSA, R., & PEREIRA, A. (2018). **A review on vegetable-based metalworking fluids: Formulation, applications, and performance**. Journal of Materials Processing Technology, 252, 92-107.

SMITH, J. et al. **Spectroscopic Methods for the Analysis of Cutting Fluids: A Review**. Trends in Analytical Chemistry, 2018.

SMITH, J., BROWN, R., & GREEN, E. (2019). **Vegetable-based cutting fluids for machining applications**. Journal of Sustainable Manufacturing and Materials Processing, 1(1), 30-44.

SOARES, C. H. E. **Curcuma Longa L. vegetable oil characterization as cutting fluid base and Curcuma Longa L. essential oil antimicrobial properties analysis for machining application**. 2020. 76 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Industrial, Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, 2020. Disponível em: https://bibliotecadigital.ipb.pt/bitstream/10198/23246/1/Soares_Cinthia.pdf. Acesso em: 04 Setembro 2023.

SOARES, R. M. **Avaliação Técnica, Mercadológica e de Tendências da Utilização Óleos Lubrificantes de Base Vegetal**. 2013. 131 f. Tese (Doutorado) - Curso de Tecnologia de Processos Químicos, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - Rj, 2013.

SOUSA, J. F. S. et al. **Qualidade do Óleo da Mamona Cultivada em Diferentes Altitudes no Rio Grande do Norte - Brasil**. Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável: Grupo Verde de Agricultura Alternativa, Mossoró - Rn, p. 12-17, 06 out. 2022.

SYAHIR, A. Z. et al. **A review on bio-based lubricants and their applications**. Journal of cleaner production, v. 168, p. 997-1016, 2017.

ZHANG, Y. et al. **Rheological Behavior and Lubrication Mechanism of a Vegetable Oil-Based Metalworking Fluid under Different Shear Rates**. Industrial Lubrication and Tribology, 2020.