

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

CAROLINE CARVALHO FERREIRA

**ESTUDO DA VIABILIDADE DE EMULSÕES A BASE DE ÓLEOS VEGETAIS
PARA USO EM PROCESSOS DE USINAGEM DE LIGA DE ALUMÍNIO 6061**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

CORNÉLIO PROCÓPIO

2023

CAROLINE CARVALHO FERREIRA

**ESTUDO DA VIABILIDADE DE EMULSÕES A BASE DE ÓLEOS
VEGETAIS PARA USO EM PROCESSOS DE USINAGEM DE LIGA DE
ALUMÍNIO 6061**

**Feasibility Study of Emulsions Based on Vegetable Oils for Use in Machining
Processes of Alloy of Aluminum**

Dissertação de Mestrado apresentada como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica do Programa de PósGraduação em Engenharia Mecânica (PPGEM) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR – Campus Cornélio Procópio

Orientador: Prof. Dra. Janaína Fracaro de Souza Gonçalves.

CORNÉLIO PROCÓPIO 2023



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

Esta licença permite que outros remixem, adaptem e criem a partir do trabalho licenciado para fins não comerciais, desde que atribuam o devido crédito e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



CAROLINE CARVALHO FERREIRA

**ESTUDO DA VIABILIDADE DE EMULSÕES A BASE DE ÓLEOS VEGETAIS PARA USO EM
PROCESSOS
DE USINAGEM DE LIGA DE ALUMÍNIO 6061**

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestra Em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Área de concentração: Ciências Mecânicas.

Data de aprovação: 03 de Maio de 2023

Janaina Fracaro De Souza Goncalves, - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Francisco Carlos Serbena, Doutorado - Universidade Estadual de Ponta Grossa (Uepg)

Dr. Joao Roberto Sartori Moreno, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dedico este trabalho a Deus que me concedeu saúde e serenidade para que pudesse continuar os estudos e aos meus pais e marido por todo apoio e incentivo, sem vocês nada disso faria sentido.

AGRADECIMENTOS

Inicialmente agradeço a Deus, pelo dom da vida e por todas as graças que têm feito em minha vida.

Aos meus pais e família, vocês são muito importantes e significativos nessa caminhada.

Aos meus amigos, que ajudaram com palavras de apoio, incentivo, e colaboraram para que pudesse seguir firme em direção aos meus sonhos.

Aos professores, meu muito obrigado, por todo conhecimento transmitido, por toda instigação que provocam em nós alunos, para irmos sempre além do que poderíamos imaginar.

A todos os colegas e amigos que sempre estiveram ao meu lado, pela amizade incondicional e pelo apoio demonstrado ao longo de todo o período de tempo em que me dediquei a este trabalho.

Em especial, ao professor Willian Ferreira da Costa e ao Laboratório da UEM, por ter se disponibilizado a ajudar na análise dos óleos. Ao professor Francisco Carlos Serbena da UEPG, pelo apoio e disponibilizado o LABMU – Complexo de Laboratórios Multiusuários da universidade, juntamente aos técnicos Douglas e Vanessa, que acompanharam os ensaios. E também a UEL, à professora Dra. Renata Katsuko Takayama Kobayashi e sua orientanda Jennifer Germinianni, que preparou as emulsões e acompanhou nos testes laboratoriais.

Os rios não bebem sua própria água, as árvores não comem seus próprios frutos. O sol não brilha para si mesmo; e as flores não espalham sua fragrância para si. Viver para os outros é uma regra da natureza. (...) A vida é boa quando você está feliz, mas a vida é muito melhor quando os outros estão felizes por sua causa.

(Papa Francisco)

RESUMO

Os desgastes excessivos causados em componentes mecânicos têm sido um fator preocupante no meio industrial. No âmbito da usinagem industrial, são utilizados os fluidos de corte, compostos que, dentre outros propósitos, servem para reduzir o desgaste das ferramentas de corte, por meio da lubrificação, prolongando a sua vida útil. Tradicionalmente, esses insumos utilizam de óleos minerais, principalmente os derivados de petróleo, como lubrificante, sendo não renováveis e com potencial de poluir o meio ambiente e causar mal aos trabalhadores. Assim, como alternativa, tem-se os óleos de origem vegetal, mais sustentáveis, renováveis e biodegradáveis. Neste contexto, o presente estudo tem como objetivo analisar o comportamento tribológico de desgaste em ensaio de pino-disco de peças de liga de alumínio 6061, utilizando-se de diferentes emulsões a base de óleo vegetais de mamona, algodão e óleo essencial de melaleuca. Para tanto, foram realizados ensaios em tribômetro do tipo pino-disco, da Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG), com oito amostras, sendo seis com fluidos a base de óleo vegetal de mamona, algodão e óleo essencial de melaleuca, uma com fluido comercial e outra a seco. A massa dos corpos-de-prova (discos) de cada amostra foi mensurada antes e após os ensaios para realizar os cálculos de perda de volume e do coeficiente de desgaste. As superfícies dos corpos-de-prova de cada uma das amostras também foram avaliadas por meio de Microscopia Eletrônica por Varredura (MEV). Os resultados da perda de volume e do coeficiente de desgaste demonstraram que os ensaios realizados com fluido produziram um menor desgaste em comparação com o realizado a seco, ao passo que todos os fluidos a base dos óleos vegetais testados obtiveram um coeficiente de desgaste menor do que o fluido comercial, com exceção da amostra 3. O melhor resultado obtido foi com a amostra 2 ($k = 0,0421 \text{ mm}^3/\text{N}$). As imagens geradas via MEV corroboraram com resultados encontrados por meio do coeficiente de desgaste, demonstrando que o principal mecanismo de desgaste nos ensaios foi o por abrasão. Todas as amostras que utilizaram fluido apresentaram uma pista de desgaste uniforme, em profundidade e largura, ao contrário da amostra com ensaio a seco, em que o desgaste ocorreu de forma irregular, confirmando a lubricidade dos fluidos utilizados. Desta forma, concluiu-se que os óleos vegetais de mamona e algodão, além do óleo essencial de melaleuca, podem ser utilizados na composição de fluidos de corte, em substituição aos óleos minerais de fonte fósseis, sendo uma alternativa mais sustentável.

Palavras-chave: Desgaste. Óleo vegetal. Usinagem. Fluido de corte.

ABSTRACT

Excessive wear caused to mechanical components has been a worrying factor in the industrial environment. In the scope of industrial machining, cutting fluids are used, compounds that, among other purposes, serve to reduce the wear of cutting tools, through lubrication, prolonging their useful life. Traditionally, these inputs use mineral oils, mainly petroleum derivatives, as a lubricant, being non-renewable and with the potential to pollute the environment and cause harm to workers. Thus, as an alternative, there are vegetable oils, which are more sustainable, renewable and biodegradable. In this context, the present study aims to analyze the tribological behavior of wear in a pin-disc test of aluminum alloy 6061 parts, using different emulsions based on castor oil, cotton and tea tree essential oil. For that, tests were carried out in a pin-disc type tribometer, from the State University of Ponta Grossa (UEPG), with eight samples, six with fluids based on castor oil, cotton and tea tree essential oil, one with fluid commercial and one dry. The mass of the specimens (discs) of each sample was measured before and after the tests to perform volume loss and wear coefficient calculations. The surfaces of the specimens of each of the samples were also evaluated by means of Scanning Electron Microscopy (SEM). The results of the loss of volume and the coefficient of wear showed that the tests carried out with fluid produced less wear compared to the one carried out dry, while all fluids based on tested vegetable oils obtained a coefficient of wear lower than the commercial fluid, with the exception of sample 3. The best result obtained was with sample 2 ($k = 0.0421 \text{ mm}^3/\text{N}$). The images generated via SEM corroborated the results found through the wear coefficient, demonstrating that the main wear mechanism in the tests was abrasion. All samples that used fluid showed a uniform wear track, in depth and width, unlike the sample with dry test, in which the wear occurred irregularly, confirming the lubricity of the fluids used. In this way, it was concluded that castor and cottonseed vegetable oils, in addition to tea tree essential oil, can be used in the composition of cutting fluids, replacing mineral oils from fossil sources, being a more sustainable alternative.

Keywords: Wear. Vegetable oil. Machining. Cutting fluid.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Formas de desgaste abrasivo	18
Figura 2 – Mecanismo de desgaste por adesão	19
Figura 3 – Tubos de um trocador de calor avariados por desgaste corrosivo..	20
Figura 4 - Desgaste por fadiga	21
Figura 5 - Sistema de dupla refrigeração a gás para torno mecânico.....	26
Figura 6 - Centro de usinagem por CNC utilizando emulsão como fluido de corte	27
Figura 7 - Centro de usinagem por CNC, utilizando óleo mineral como fluido de corte	28
Figura 8 - Alinhamento de moléculas polares (óleos vegetais) em comparação com moléculas apolares (óleos minerais)	32
Figura 9 - Plantação de algodoeiro	34
Figura 10 - Mamoneira	36
Figura 11 – Plantação de <i>Melaleuca alternifolia</i> (à esq.) e partes aéreas da planta picadas (à dir.).....	39
Figura 12 - Modelo tribômetro pino-disco	41
Figura 13 - Representação esquemática do dispositivo pino-disco	42
Figura 14 – Fluxograma dos procedimentos metodológicos	43
Figura 15 – Tribômetro HIGH Temperature Tribometer	44
Figura 16 – Dimensões do copo adaptado (à esq.) e copo adaptado instalado no equipamento (à dir.).....	45
Figura 17 – Recomendações para formulação de fluidos de corte com o uso de óleos vegetais pelo Laboratório de Química do Centro de Ciências Biológicas da UEL	46
Figura 18 – Fluxograma de ações para a realização do ensaio tribológico pino- disco	47
Figura 19 – Rugosímetro e amostras preparadas para o teste.....	58
Figura 20 – Teste de rugosidade das amostras	59
Figura 21 – Pista de desgaste do corpo-de-prova da amostra 1 (Fluido 4CTL)	63
Figura 22 – Pista de desgaste do corpo-de-prova da amostra 2 (Fluido 4)	64
Figura 23 – Pista de desgaste do corpo-de-prova da amostra 3 (Fluido 18 Biocida).....	65

Figura 24 – Pista de desgaste do corpo-de-prova da amostra 4 (Fluido 18 CTL)	65
Figura 25 - Pista de desgaste do corpo-de-prova da amostra 5 (Fluido 13 Biocida)	66
Figura 26 - Pista de desgaste do corpo-de-prova da amostra 6 (Fluido 10 Biocida)	67
Figura 27 - Pista de desgaste do corpo-de-prova da amostra 7 (Fluido comercial)	67
Figura 28 - Pista de desgaste do corpo-de-prova da amostra 8 (sem fluido)....	68

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Coeficiente de desgaste de todas as amostras, em mm³/N.m	53
Gráfico 2 - Coeficiente de desgaste de todas as amostras com fluido, em mm³/N.m	54
Gráfico 3 - Parâmetro de rugosidade Ra (rugosidade média aritmética) na superfície desgastada das amostras.....	61
Gráfico 4 - Parâmetro de rugosidade Rq (rugosidade quadrática média) na superfície desgastada das amostras.....	61
Gráfico 5- Parâmetro de rugosidade Rz (altura máxima dos picos e vales) na superfície desgastada das amostras.....	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características físico-químicas do óleo de algodão	35
Tabela 2 - Características típicas de óleo de mamona.....	37
Tabela 3 – Características físico-químicas do óleo essencial de melaleuca	40
Tabela 4 – Propriedades físico-químicas da liga de alumínio 6061.....	48
Tabela 5 – Parâmetros utilizado no ensaio tribológico	49
Tabela 6 – Identificação das amostras com os fluidos para o ensaio tribológico, além de seu diâmetro e altura.	51
Tabela 7 - Análise de perda de massa das amostras	52
Tabela 8 – Parâmetros iniciais para os cálculos da perda de volume e coeficiente de desgaste das amostras	52
Tabela 9 – Volume perdido, em mm ³ , e coeficiente de desgaste, em mm ³ /N.m, de cada uma das amostras ensaiadas com seus respectivos fluidos	53
Tabela 10 – Condicionantes utilizados para a realização do teste de rugosidade nas amostras.....	59
Tabela 11 – Resultados obtidos no teste de rugosidade sob a superfície desgastada das amostras	60
Tabela 12 – Média e desvio padrão dos valores obtidos no teste de rugosidade para cada amostra	60

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
EP	Extrema pressão
UEL	Universidade Estadual de Londrina
UEPG	Universidade Estadual de Ponta Grossa
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura

LISTA DE SÍMBOLOS

°C	Graus celsius
cm ³	Centímetros cúbicos
ρ	Densidade
Δm	Diferença de massa
CO ₂	Dióxido de carbono
g	Gramma
HB	Dureza Brinell
HV	Dureza Vickers
k	Coefficiente de desgaste
L	Distância percorrida
m	Metro
mg	Miligrama
mm	Milímetro
mm ³	Milímetro cúbico
MoS ₂	Bissulfeto de molibdênio
MPa	Mega Pascal
N	Nitrogênio/Newtons
OH	Hidroxila
P	Carga do pino
r	Raio
Ra	Rugosidade média aritmética
Rq	Rugosidade quadrática média
Rz	Altura máxima dos picos e vales
rpm	Rotações por minuto
V	Volume

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	Desgaste	16
2.1.1	Desgaste abrasivo.....	17
2.1.2	Desgaste adesivo.....	18
2.1.3	Desgaste corrosivo.....	19
2.1.4	Desgaste por fadiga	21
2.2	Manufatura sustentável na usinagem	22
2.3	Fluidos de corte	23
2.3.1	Tipos de fluidos de corte	25
2.3.1.1	<i>Fluidos de corte gasosos</i>	25
2.3.1.2	<i>Fluidos de corte sólidos</i>	26
2.3.1.3	<i>Fluidos de corte líquidos</i>	27
2.4	Manufatura sustentável em processos de usinagem.....	29
2.5	Fluidos de corte a base de óleo vegetal e óleo essencial de plantas ...	30
2.5.1	Óleo de algodão.....	34
2.5.2	Óleo de mamona.....	36
2.5.3	Óleo essencial de melaleuca.....	38
2.6	Tribômetro pino-disco e suas aplicações	40
3	MATERIAIS E MÉTODOS	43
3.1	Preparação do tribômetro.....	43
3.2.	Preparo das emulsões com os óleos vegetais de algodão e mamona e óleo essencial de melaleuca.....	45
3.3	Ensaio tribológico	47
3.4	Cálculo da perda de volume e coeficiente de desgaste	49
4	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	51
4.1	Análise da perda de volume por massa e do coeficiente de desgaste das amostras	52
4.2	Análise de rugosidade das superfícies de desgaste das amostras.....	63
4.3	Análise do desgaste via MEV	63
5	CONCLUSÕES	69
5.1	Recomendações para trabalhos futuros	65
	REFERÊNCIAS	71

1 INTRODUÇÃO

Todo equipamento, seja ele elétrico ou mecânico, possui uma vida útil, isto é, um período em que pode ser utilizado sem que suas peças ou componentes percam sua eficácia, ofereçam riscos ou fiquem obsoletas. Essa vida útil pode ser prolongada ou encurtada conforme o seu modo de uso, sendo necessário considerar uma série de fatores, entre eles, no caso de equipamentos mecânicos, a falta de lubrificação, que gera desgaste por atrito (SUMARA *et al.*, 2021).

É necessário dizer que o homem vem, desde a antiguidade, desenvolvendo técnicas para a redução do atrito, a exemplo da invenção da roda, um grande marco para a humanidade. Na contemporaneidade, esse fenômeno físico continua sendo estudado, como no setor industrial, em que se tem a necessidade de reduzir o desgaste de componentes mecânicos em decorrência do atrito, tendo em vista que as quebras dos mesmos causam perdas em produção e gastos com substituições e manutenções.

Vale salientar também que as soluções tecnológicas no século XXI precisam ser sustentáveis, dada a preocupação global com as mudanças climáticas acarretadas pela ação do homem, sobretudo no âmbito das indústrias de produção, setor considerado um dos principais responsáveis pela poluição do meio ambiente. Sendo assim, busca-se uma produção industrial mais sustentável, ou seja, que alie o desenvolvimento econômico com o baixo, ou nenhum, impacto ao meio ambiente e à sociedade.

De acordo com Dantas *et al.* (2021), a sustentabilidade apoia-se em três pilares centrais, sendo eles o desenvolvimento econômico, a preservação ambiental e o desenvolvimento social. Assim, quando se aborda sobre medidas sustentáveis, elas devem propor soluções que beneficiem esses três aspectos. No setor industrial, o século XXI demarca a chegada da chamada Quarta Revolução Industrial, ou Indústria 4.0, em que o foco é a melhoria da eficiência e produtividade dos processos, o que, por sua vez, envolve torná-los mais sustentáveis.

Neste interim, considerando a necessidade de se reduzir o atrito de componentes mecânicos e de se utilizar de técnicas e produtos sustentáveis, vêm-se aumentando a procura por biolubrificantes, isto é, lubrificantes de origem vegetal, uma vez que os disponibilizados no mercado são produzidos, em sua maioria, a partir

fontes fósseis, como o petróleo, não renovável e que possui características poluidoras, seja na extração, no uso ou descarte.

Como opção aos óleos minerais, tem-se o óleo vegetal, substância biodegradável com a capacidade comprovada de ser decomposta em um intervalo de até um ano, o que faz com que seja um produto menos tóxico e agressivo ao meio ambiente. O Brasil possui uma diversidade de plantas oleaginosas e um grande potencial de produção de óleo vegetal, podendo ser extraído de diversas plantas que crescem em diferentes condições ambientais e solos diversificados (SILVA *et al.*, 2019).

Os biolubrificantes são originados a partir do óleo vegetal, obtido por meio do processamento de partes de vegetais, principalmente as sementes. A sua utilização em máquinas e equipamentos perpassa por uma gama de parâmetros que devem ser observados para garantir o prolongamento de sua vida útil, como propriedades antioxidantes, índice de viscosidade, acidez, entre outros (SUMARA *et al.*, 2021).

Desta forma, estudos na área de biolubrificantes, combinado aos comportamentos tribológicos em componentes mecânicos, propõe alternativas para reduzir o desgaste por atrito. Os ensaios tribológicos são alternativas iniciais de análise na etapa de desenvolvimento dos fluidos de corte, uma vez que permitem uma maior flexibilidade para alteração da formulação, em que são obtidas informações sobre suas características, principalmente, a sua lubricidade (SOUZA, 2015).

Um dos equipamentos mais utilizados para o estudo desses fenômenos são os tribômetros, que tem como principal função simular situações de atrito e desgaste de forma controlada. Os ensaios de desgaste por meio de tribômetros são de extrema importância, já que permitem simular uma situação de degradação que ocorreria em um equipamento durante um longo período de utilização (MALDANER *et al.*, 2021).

Sendo assim, o presente estudo teve como objetivo principal analisar o comportamento tribológico de desgaste em ensaio de pino-disco de peças de liga de alumínio 6061, utilizando-se de diferentes emulsões a base de óleo vegetais de mamona, algodão e óleo essencial de melaleuca. Os objetivos específicos foram: realizar ensaios de desgaste em tribômetro industrial pino-disco com emulsões a base de óleos vegetais; analisar a capacidade de emulsões de evitar o desgaste de uma peça de alumínio 6061, a partir do cálculo do volume perdido, do coeficiente de desgaste e análise via MEV; avaliar o potencial de uso dos óleos vegetais de algodão, mamona e melaleuca como componente para a produção de fluidos de corte.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, é abordado sobre o desgaste e os seus tipos, manufatura sustentável industrial e usinagem, as funções e composições dos fluidos de corte, óleos vegetais e essenciais e sobre teste de desgaste com tribômetros.

2.1 Desgaste

O termo desgaste se refere ao fenômeno de alteração ou redução da forma original de determinado objeto, por meio do movimento relativo entre superfícies em contato, ou por ação de um agente corrosivo. Toda superfície sólida, quando entra em contato, está sob influência da força de atrito (MARQUES *et al.*, 2015).

A relação entre atrito e desgaste depende de inúmeras variáveis, como o tipo de material em contato (dureza, aspereza, etc.), a forma como o movimento ocorre (força aplicada e direção), o tamanho das superfícies que se encontram, a existência de material lubrificante, entre outras características que, em determinadas condições, gera uma alta resistência e, conseqüentemente, a perda de material superficial. Se tratando de um equipamento mecânico, muitos mecanismos podem sofrer com desgaste por atrito, separadamente ou ao mesmo tempo, principalmente quando envolve os metais, materiais com características, como alta dureza, rugosidade e alta tenacidade, propícias para desenvolver o fenômeno (MALDANER *et al.*, 2021).

O desgaste de um material, equipamento ou ferramenta tem como consequência a falha. De acordo com Santos *et al.* (2015), o desgaste mecânico é um dano que envolve a perda de materiais entre duas superfícies em contato, sobretudo quando estes se movimentam em sentidos opostos, além do desgaste por corrosão, que se trata de um fenômeno eletroquímico. Ou seja, o dano ocorre na superfície dos componentes e é resultado do seu movimento em relação as partes adjacentes de trabalho, podendo afetar, desta forma, todo o funcionamento de um equipamento.

Segundo Viana, Vasconcellos e Vasconcellos (2021), é importante salientar ainda que o desgaste não se limita apenas a perda de materiais, mas também pode acarretar em uma deformação plástica, a exemplo da fadiga. O autor comenta ainda que o desgaste por atrito é a principal causa da perda de propriedades mecânicas, e que a falta de um agente que o impeça ou reduza pode resultar em prejuízos consideráveis.

Para Diehl, Dong e Rocha (2019), ao se falar sobre desgaste, primeiramente, é preciso entender seus principais mecanismos, já que a sua intensidade depende inúmeras condições. Sendo assim, cabe agora entender melhor as quatro formas de desgaste, sendo elas o desgastem abrasivo, adesivo, corrosivo e por fadiga.

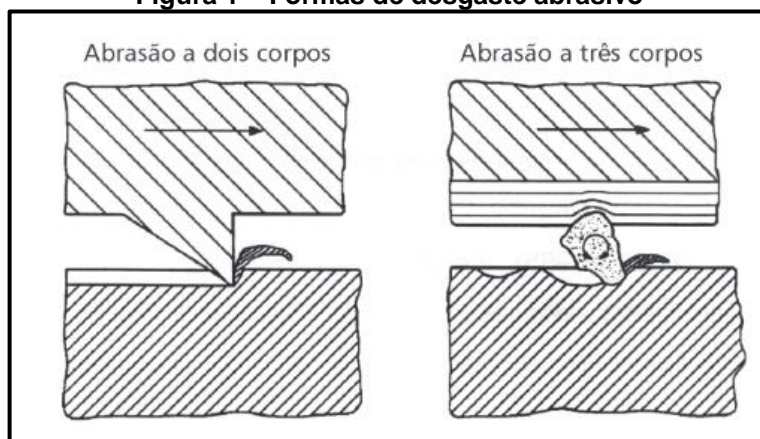
2.1.1 Desgaste abrasivo

Quando se trata de mecanismos, o desgaste abrasivo é um dos mais relevantes, uma vez que as superfícies dos componentes que os formam estão em contato direto e, geralmente, movimentando-se, fazendo com que esse tipo de desgaste tenha uma maior probabilidade de ocorrer, caso não haja a devida lubrificação. De acordo com Marques *et al.* (2016), o desgaste por abrasão pode ser definido como a interação mecânica de saliências grosseiras ou partículas não metálicas contra as superfícies de trabalho, provocando perda de massa por corte ou por arrancamento.

Para Ramos *et al.* (2014), tais partículas podem ser, por exemplo, um mineral duro, como a sílica, ou o próprio fragmento do material desgastado. As protuberâncias, como a rugosidade superficial, podem agir como partículas de alta dureza, caso esta superfície apresente maior dureza que a contra-peça. Assim, é possível afirmar que o desgaste abrasivo surge do contato entre superfícies sólidas com diferentes graus de dureza e rugosidade, gerando a remoção do material superficial que entra em contato. Este mecanismo de desgaste é considerado como uma das principais causas de perda de vida útil de ferramentas de usinagem, gerando gastos no setor.

De acordo com Viana, Vasconcelos e Vasconcelos (2021), existem 2 tipos de desgaste abrasivo, conforme mostra a Figura 1. O primeiro deles é o desgaste abrasivo de dois corpos, que é o que acontece, por exemplo, nos processos de lixamento, em que a superfície mais dura é o agente de abrasão. O segundo tipo de desgaste é conhecido como desgaste abrasivo de três corpos, a qual ocorre por ação de um terceiro corpo, como no caso de polimento com pasta diamantada. Esse terceiro corpo, geralmente, consiste em partículas de alta dureza que, conforme movimentam-se, gera desgaste em uma ou ambas superfícies.

Figura 1 – Formas de desgaste abrasivo



Fonte: Fernandes (2017)

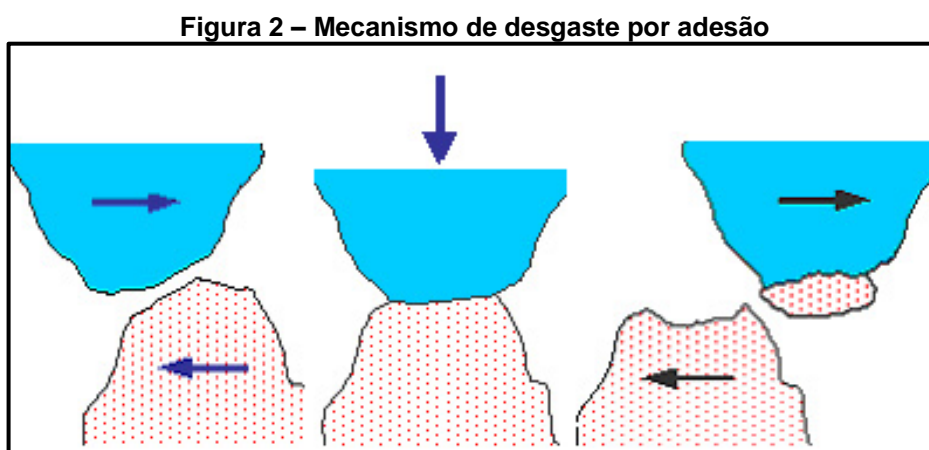
Neste ponto, é importante citar o estudo realizado por Trezona, Allsopp e Hutchings (1999), o qual sugere a substituição dos termos “desgaste abrasivo de dois corpos” e “desgaste abrasivo de três corpos”, por abrasão por deslizamento e abrasão por rolamento, respectivamente, a fim de evitar interpretações contraditórias destes termos na literatura.

Para além das formas com que o desgaste por abrasão pode vir a ocorrer, Lacerda e Cozza (2020) citam que, no funcionamento de mecanismos e na dinâmica de movimento entre materiais sólidos, este é um tipo de desgaste com alta ocorrência, uma vez que dificilmente dois materiais terão a mesma dureza, no caso do desgaste por deslizamento, ou não haverá partículas duras para realizar o desgaste por rolamento, advindos de fontes externas ou do próprio processo de desgaste. Assim, salienta-se a necessidade de lubrificação para minimizar esse processo, já que será formada uma camada protetora sobre a superfície da peça, impedindo o contato direto entre os materiais.

2.1.2 Desgaste adesivo

Outra forma de desgaste que pode ocorrer em equipamentos mecânicos é o chamado desgaste adesivo, que, basicamente, se trata da transferência de material de uma superfície para outra, devido as forças envolvidas. Corroborando com essa informação, Moura *et al.* (2017) ressaltam que o desgaste adesivo é definido como aquele que ocorre quando existe a transferência de material de uma superfície para a outra, seja por meio de uma carga e por movimento relativo.

Para Viana, Vasconcelos e Vasconcelos (2021), o desgaste adesivo é uma das formas mais graves que existem e embora existam vários estudos que tratem sobre, ainda não existe uma teoria exata que consiga prever a sua ocorrência. Este tipo de desgaste é caracterizado por altas taxas de perda de material e um alto coeficiente de atrito instável. O autor ainda relata que os contatos deslizantes podem ser rapidamente destruídos pelo desgaste adesivo, em que o movimento pode ser impedido pela existência de um alto coeficiente de atrito. Esse tipo de desgaste ocorre, predominantemente, nos picos das asperezas em contato entre as duas superfícies, com sua intensidade sendo proporcional a afinidade entre os metais em contato. A Figura 2 demonstra o mecanismo de desgaste por adesão.



Fonte: Fernandes (2017)

Em estudo sobre os tipos de desgaste em ligas metálicas, Castro *et al.* (2019) afirmam que o desgaste adesivo, juntamente com o abrasivo, são os principais no que diz respeito o contato de metais em movimento, uma vez que, por mais que a superfície aparente ser plana, ela possui rugosidade, ao passo que em materiais sólidos e de alta dureza, como é o caso de ligas metálicas, há uma forte tendência para a transferência de material de uma superfície para outra, fenômeno que é potencializado com a falta de lubrificação.

2.1.3 Desgaste corrosivo

Outro processo ligado com o desgaste é a corrosão que, ao contrário dos anteriores, não ocorre por processos mecânicos, mas químicos. De acordo com Costa *et al.* (2014), a corrosão pode ser entendida como um tipo de desgaste que tem origem

em uma ação química ou eletroquímica, em que há a transferência de elétrons de um tipo químico para o outro, podendo estar ou não associado a esforços mecânicos.

Para Milcheski *et al.* (2021), a corrosão é a deterioração que ocorre de forma gradual na superfície dos metais, por meio de uma reação química ou eletroquímica, quando estes são expostos a um ambiente reativo. O processo corrosivo está ligado com grandes perdas no setor industrial, podendo, por exemplo, gerar a parada das atividades de uma planta industrial e o desperdício de produtos e recursos valiosos devido à contaminação, os quais, por sua vez, reduzem a eficiência de produção e aumentam gastos com manutenção e projetos de prevenção.

Figura 3 – Tubos de um trocador de calor avariados por desgaste corrosivo



Fonte: Costa *et al.* (2014)

Como pode ser visto na Figura 3 o desgaste por corrosão afeta a estrutura do material devido as ligações eletroquímicas entre o metal e o agente corrosivo, sendo a água e o ar, por possuírem oxigênio e serem abundantes, os principais causadores de corrosão. Esse processo é chamado de oxirredução, uma diferença de potencial elétrico entre os materiais que gera trocas catódicas e anódica entre o material e o agente (BAESSO *et al.*, 2021).

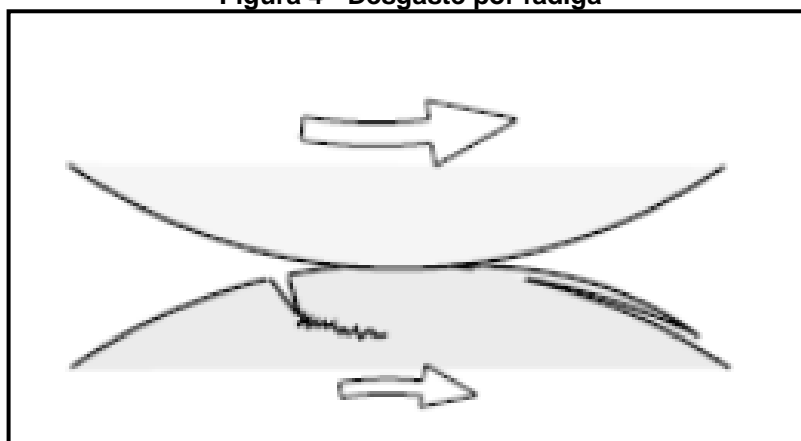
Os metais ferrosos são especialmente afetados por processos corrosivo por possuírem um potencial de oxidação maior que o agente corrosivo, como o oxigênio presente na água e no ar, levando a uma perda de elétrons e, conseqüentemente, massa, além da uma mudança na composição do material, surgindo à ferrugem. A lubrificação também possui vital importância para impedir o desgaste corrosivo, já que a substância lubrificante forma um filme superficial protetor no material, impedindo a troca de elétrons e a oxirredução (BAESSO *et al.*, 2021).

2.1.4 Desgaste por fadiga

Por fim, tem-se o desgaste por fadiga, responsável pela formação de trincas e lascamentos, gerado por um carregamento cíclico e repetitivo em superfícies sólidas. A falha por fadiga superficial segue a seguinte sequência: deformação elástica, deformação plástica, encruamento, formação e propagação de trincas (FARIAS, 2017).

De acordo com Bayer (2004), a fadiga em um material pode ser descrita como a perda de suas propriedades mecânicas, quando ele é submetido a solicitações cíclicas, podendo culminar em sua ruptura. Esse fenômeno pode ocorrer em qualquer componente ou parte que se mova ciclicamente, como, por exemplo, as asas de um avião, um motor a combustão de um automóvel ou em uma ferramenta de corte de usinagem sob variação cíclica de força, velocidade e temperatura na realização de cortes em materiais.

Figura 4 - Desgaste por fadiga



Fonte: Fernandes (2017)

Esse processo de quebra tem início, geralmente, a partir de fissuras na superfície do material que progridem perpendicularmente em relação a tensão a qual está sujeita. Essa progressão é originada por uma deformação plástica na base das fissuras, juntamente com o aumento constante de concentração de tensões, até atingir uma dimensão crítica e fraturar-se bruscamente, causando a chamada falha por fadiga (BAYER, 2004).

A resistência à fadiga dos materiais pode ser determinada por meio das chamadas curvas de fadiga, em que são relacionadas a tensão aplicada e o número de ciclos necessários para que a fadiga ocorra. A fadiga também está ligada com

outros mecanismos de desgaste, principalmente o desgaste corrosivo, que pode originar fissuras superficiais por meio do enfraquecimento do material, iniciando a fadiga, ou, ao contrário, em que as fissuras por fadiga dão início ao processo corrosivo. Neste último caso, a base da fissura atua como um ânodo em relação ao resto do material e, quando um eletrólito penetra no interior da fissura, provoca corrosão e acelera a progressão da mesma (FARIAS, 2017).

2.2 Manufatura sustentável na usinagem

Após entender melhor sobre o que é desgaste e seus tipos, é necessário comentar sobre a questão da manufatura sustentável dentro dos processos de usinagem. De acordo com Portney (2015), o termo sustentável está ligado com a capacidade de um determinado fenômeno ou processo se manter ao longo tempo, sem causar impactos externos. Nesse contexto, uma manufatura sustentável é aquela que produz sem agredir, seja o meio ambiente ou a sociedade como um todo.

Em outras palavras, trata-se de produção com técnicas, tecnologias e procedimentos que visam eliminar ou minimizar os impactos, sejam ambientais ou sociais, negativos que possam causar, devendo ser, ainda, economicamente viável. É possível dizer, portanto, que a manufatura sustentável se preocupa com eficiência dos processos, considerando as questões econômicas, ambientais e sociais, formando, assim, a base tríplice do conceito de sustentabilidade (PORTNEY, 2015).

Sobre o assunto, Agwu e Bessant (2021) citam que, de acordo com a teoria dos três setores, atualizada recentemente para a dos cinco setores, a manufatura é o segundo setor da economia e inclui todas as atividades industriais da fábrica para o cliente e vice-versa. A busca global por modelos de negócios sustentáveis é, atualmente, um grande desafio para a manufatura, que historicamente se debruça na ampla utilização de recursos naturais de maneira indiscriminada, sobretudo com a adoção de um estilo de vida consumista da sociedade, após as primeiras revoluções industriais.

Desta maneira, é de suma importância que haja uma mudança de paradigma nos modelos de produção, adotando-se técnicas e tecnologias que reduzam ou eliminem qualquer impacto ambiental, uma vez que o setor industrial é um dos principais responsáveis pela degradação ambiental, mantendo-se o crescimento econômico, algo que pode ser especialmente desafiador. Especificamente sobre as

atividades industriais de usinagem, um dos principais problemas está no uso de fluidos de corte a base de óleo minerais, os quais possuem grande potencial de danos ao meio ambiente, seja na sua obtenção ou descarte, ou ao ser humano, por serem relativamente tóxicos (SANKARANARAYANAN *et al.*, 2021).

Sobre o assunto, Oliveira e Alves (2007) argumentam que a utilização de fluidos de corte no processo de usinagem faz da indústria metalmeccânica, um ramo com um alto potencial poluidor e de gerar efeitos deletérios ao ser humano. São vários problemas decorrentes dessa utilização, como, por exemplo, a degradação do solo e poluição de recursos hídricos ao serem descartados. Além disso, durante a usinagem, os fluidos de corte podem mudar sua composição, devido ao calor e pressão, gerando substâncias secundárias tóxicas ao ser humano.

Assim, para entender melhor sobre o assunto da manufatura sustentável nos processos de usinagem, é essencial tratar sobre os fluidos de corte, uma vez que tais produtos são um dos principais problemas no que tange a sustentabilidade neste setor industrial.

2.3 Fluidos de corte

Antes de tratar sobre fluido de corte, é preciso entender primeiro o que é o processo de usinagem. Dentre os diversos segmentos industriais, a usinagem é uma das etapas produtivas e diz respeito a um conjunto de processos em que determinado material, como metal, polímeros, madeira, entre outros, é trabalhado de maneira a tomar uma forma, dimensão ou acabamento superficial específico. São inúmeros os processos englobados dentro do termo usinagem, sendo possível citar o torneamento, a fresamento, a furação e o aplainamento (MACHADO *et al.*, 2015).

De acordo com Stoeterau (2003), todos esses processos envolvem grandes esforços, o que, por sua vez, acarreta na geração de calor, sobretudo quando se trabalha com materiais duros, a exemplo das ligas metálicas, ferrosas ou não. Sendo assim, é preciso a adição de uma substância capaz de resfriar a área que está sendo trabalhada na atividade de usinagem, além de limpá-la e lubrificá-la, auxiliando o processo de corte. Neste interim, tem-se os fluidos de corte, um insumo utilizado nos processos de usinagem e que possui a função de manter o material em uma temperatura adequada, além de auxiliar a ferramenta de corte a remover o material da peça, prolongando a sua vida útil.

As três principais funções que um fluido de corte deve cumprir é o resfriamento, lubrificação e limpeza da região de corte. A escolha pelo uso ou não de um fluido de corte nos processos de usinagem depende de alguns fatores, mas, principalmente da dureza do material a ser trabalhado. No caso dos metais, com exceção de algumas ligas metálicas mais macias, o uso de fluidos que possuam essas três características é essencial para garantir a qualidade do trabalho de usinagem (FERRARESI, 2018).

Sobre a função de resfriamento, o corte de materiais de alta dureza despende de grande energia, o que, por sua vez, é transformada, em parte, em calor. Um superaquecimento na usinagem pode acarretar em diversos problemas, indo desde a deformação e perda de características geométricas e físicas da peça usinada, tornando-a fora do padrão exigido, até a prejuízos nos equipamentos de usinagem e ferramentas de corte, como a perda de pastilhas de torno, brocas, entre outras (CALLEGARO; CESAR, 2019).

De acordo com Machado *et al.* (2015), a capacidade de uma substância de realizar o resfriamento envolve inúmeras variáveis, como a sua viscosidade, o seu calor específico e o seu coeficiente de condutibilidade térmica. Quando se trata do processo de usinagem de ligas metálicas, a velocidade com que o fluido resfria a peça também deve ser considerada, uma vez que ela influencia diretamente nas suas propriedades físicas, como a sua dureza.

Outra função do fluido de corte é a de lubrificação, que, de acordo com Ferraresi (2018), é a capacidade que um fluido tem de minimizar o atrito e o desgaste de superfícies metálicas sob cargas, levando em consideração as propriedades físicas do composto, como viscosidade e tensão superficial. Ter características lubrificantes é essencial para um fluido de corte, já que a formação de uma película sobre a superfície do material a ser trabalhado garante um menor atrito entre a peça e a ferramenta, levando a um menor desgaste da ferramenta de corte.

De acordo com Machado *et al.* (2015), para que um material atue como um lubrificante, é necessário que ele apresente características físico-químicas adequadas, como a viscosidade cinemática, índice de viscosidade, ponto de inflamação, índice de acidez, ponto de fluidez, estabilidade oxidativa, volatilidade, etc.

Entre tais características, destaca-se os valores de viscosidade. A viscosidade cinemática é a medida de resistência ao escoamento de um fluido, sendo uma das principais propriedades de substâncias lubrificantes. A viscosidade aumenta devido à oxidação, presença de insolúveis, água e contaminação por óleos de maior

viscosidade. O índice de viscosidade é um número adimensional que mede a intensidade de variação da viscosidade em relação à temperatura. Quanto maior o índice de viscosidade, menor é a sua variação em função da temperatura (MACHADO *et al.*, 2015).

Outra função dos fluidos de corte é o de limpeza da peça, já que os processos de usinagem geram resíduos provenientes do desbaste, chamados de cavacos. Esses cavacos, caso não sejam retirados da superfície, pode gerar irregularidades na peça, exigindo retrabalho e, por vezes, inutilizando-a. Também, no caso da usinagem manual, auxiliam o operador a ter uma visão limpa da superfície usinada (CALLEGARO; CESAR, 2019).

Além dessas funções, eles também podem apresentar algumas outras propriedades que produzirão, em níveis operacionais, melhores resultados, sendo elas: antiespumante, anticorrosiva, antioxidante, antidesgaste, antisolda (EP), umectação, capacidade de absorção de calor, entre outros (MACHADO *et al.*, 2015). Assim, parte-se agora para a discussão sobre os tipos de fluidos de corte.

2.3.1 Tipos de fluidos de corte

Existem inúmeros tipos de fluidos de corte que podem ser utilizados na usinagem, os quais podem ser divididos em relação ao seu estado físico, sendo eles: gasosos (ar, CO₂, N); líquidos (água, emulsões, fluidos emulsionáveis, soluções químicas, óleos) e; sólidos (grafite, bissulfeto de molibdênio).

2.3.1.1 Fluidos de corte gasosos

Se considerar o ar atmosférico como um fluido de corte, é possível afirmar, sem sombra de dúvidas, que se trata do fluido de corte mais utilizado, estando presente até mesmo nos processos de usinagem a seco, isto é, quando não se tem a intenção de usar um fluido para trabalhar o material. A sua principal propriedade é a boa capacidade de refrigeração, além de auxiliar na limpeza da peça, sem contaminá-la (LISBOA; MORAES; HIRASHITA, 2013).

O ar atmosférico, quando utilizado de maneira intencional, é comprimido e aplicado sobre a peça em usinagem, de modo a melhorar a refrigeração e limpar a

área usinada. Além do ar atmosférico, o dióxido de carbono (CO₂) e o nitrogênio (N) também podem ser utilizados como fluidos de corte, sendo que ambos possuem maior capacidade de refrigeração em comparação com o ar (DACAS; COSTA, 2020). A Figura 5 traz a imagem de um torno mecânico com um sistema de dupla refrigeração com ar comprimido criogênico e nitrogênio.

Figura 5 - Sistema de dupla refrigeração a gás para torno mecânico



Fonte: Dacas e Costa (2020, p. 39)

De acordo com Lisboa, Moraes e Hirashita (2013), a principal desvantagem dos fluidos de corte gasosos é que não possuem propriedades lubrificantes, limitando a sua utilização para materiais mais maleáveis (madeira, liga metálicas macias) ou que não admitem outros tipos de fluidos.

2.3.1.2 Fluidos de corte sólidos

Outra classe de fluidos de corte são os sólidos, representados principalmente pelo grafite e pelo bissulfeto de molibdênio (MoS₂), e, ao contrário dos gasosos, possuem como característica principal um alto poder de lubrificação, mesmo em condições de extrema pressão, entretanto, não possuem capacidade de refrigeração. Além disso, eles não possuem a capacidade de limpar a peça, já que ele é aplicado antes do início do trabalho de usinagem, sendo retirado o desbaste é realizado (LISBOA; MORAIS; HIRASHITA, 2013).

2.3.1.3 Fluidos de corte líquidos

Os fluidos de corte líquidos são, sem sombra de dúvidas, os que possuem maior amplitude de utilização dentro dos processos de usinagem, sendo possível gerar formulações específicas para aplicações em diferentes materiais, englobando as funções de lubrificação, resfriamento e limpeza da peça. Dentro deste grupo de fluidos, é possível dizer que o mais simples e acessível é a água, que, de acordo com Lisboa, Moraes e Hirashita (2013), foi o primeiro fluido de corte líquido utilizado dentro das atividades de usinagem. A água possui ótima capacidade de resfriamento, contudo, o seu uso em metais ferrosos provoca processos corrosivos, além de baixo poder lubrificante.

Para resolver os problemas relacionados com o uso de água como fluido de corte, começou-se a adicionar diferentes substâncias de modo a torna-la mais lubrificante e menos reagente aos metais passíveis de oxidação, criando-se, assim, as emulsões, também conhecidas como óleos solúveis. De maneira geral, as emulsões correspondem a uma gama de fluidos de cortes baseados em uma mistura de óleo e água. O tipo de óleo (mineral, graxo ou sintético/semisintético) utilizado na emulsão, bem como a proporção utilizada e a presença de aditivos, lhe confere características específicas, podendo apresentar alto poder de lubrificação, agente EP, propriedades anticorrosiva, antioxidativa, antimicrobiana, detergente, entre outras (SÁ, 2010).

Figura 6 - Centro de usinagem por CNC utilizando emulsão como fluido de corte



Fonte: Chemlub (2017)

Além das emulsões, os óleos puros (sem a adição de água) também podem ser utilizados como fluidos de cortes, sejam eles minerais, isto é, derivados do petróleo, ou graxos, de origem animal/vegetal. As principais vantagens dos óleos são a sua alta capacidade de lubrificação, manutenção de sua lubricidade em condições de extrema pressão, além de possuírem, naturalmente, propriedades anticorrosivas. Geralmente são empregues em processos de usinagem extremos, que exigem uma ótima lubrificação para auxiliar no trabalho da peça, além de resistência a pressão (SÁ, 2010).

Figura 7 - Centro de usinagem por CNC, utilizando óleo mineral como fluido de corte



Fonte: Solutio (2023)

Também tem as soluções químicas, que correspondem a uma gama de produtos, geralmente solúveis em água, compostos por sais orgânicos e inorgânicos, além de outros aditivos que potencializam a capacidade refrigerante, anticorrosão, detergente, etc. Por outro lado, possuem baixo poder de lubrificação, sendo utilizados, portanto, em processos em que a refrigeração é a prioridade (MAIA *et al.*, 2007).

De maneira geral, os fluidos de corte líquidos são predominantes no mercado devido as suas propriedades diversas, entretanto, existem críticas quanto aos impactos que geram, seja na produção, no seu uso ou no descarte, para o meio ambiente e para o homem, sobretudo os que se utilizam de óleos derivados de fontes não renováveis, como o petróleo. Assim, pesquisas vêm sendo realizadas, buscando alternativas menos agressivas ao meio ambiente e para o homem, ao passo que se mantenha as propriedades desejáveis para os processos de usinagem, sendo que,

uma das possíveis saídas é o uso de fluidos de corte a base de óleo vegetal, conforme será abordado a seguir.

2.4 Manufatura sustentável em processos de usinagem

A manufatura sustentável, também conhecida como manufatura verde, refere-se à prática de produção industrial que minimiza os impactos ambientais, reduzindo o consumo de recursos naturais, a emissão de poluentes e o desperdício de materiais ao longo de todo o ciclo de vida do produto (WANG, 2009).

Existem várias abordagens e estratégias para promover a manufatura sustentável. Eficiência energética por exemplo é uma dessas abordagens, onde ocorre a adoção de tecnologias e processos que reduzem o consumo de energia, como o uso de equipamentos energeticamente eficientes, a otimização de sistemas de iluminação e a implementação de práticas de gestão de energia (DUFLOU *et al.*, 2012).

A gestão de resíduos também se enquadra como uma abordagem, pois trabalha na redução, reutilização e reciclagem de resíduos gerados durante o processo de manufatura. A utilização de materiais sustentáveis, como aqueles que tenham um menor impacto ambiental, a exemplo de materiais reciclados, biodegradáveis ou provenientes de fontes renováveis, também se encontram no escopo da manufatura sustentável.

Uma outra importante abordagem é a avaliação do ciclo de vida de um produto, desde a extração de matérias-primas até a disposição final, para identificar oportunidades de melhoria e redução de impactos ambientais ao longo de todas as etapas. Assim, é possível dizer que a manufatura sustentável busca equilibrar as necessidades econômicas, sociais e ambientais, promovendo a eficiência e a redução do impacto ambiental da indústria. Ao adotar práticas sustentáveis, as empresas podem reduzir custos, melhorar sua reputação e contribuir para um futuro mais sustentável.

Conforme mencionado no item 2.3.13, os fluidos de corte são substâncias utilizadas na usinagem para lubrificação, refrigeração e limpeza dos processos. No entanto, a sustentabilidade desses fluidos pode ser uma preocupação devido à sua formulação, que pode conter componentes prejudiciais ao meio ambiente e à saúde humana. Nesse contexto, o objetivo deste projeto foi explorar alternativas para tornar

os processos de usinagem mais sustentáveis, substituindo o uso de materiais provenientes de fontes renováveis, como óleos vegetais. Essa abordagem visa mitigar os impactos negativos e promover práticas mais ambientalmente amigáveis.

Assim, o presente estudo parte da necessidade de substituir o uso de óleo de base mineral derivado de recursos não renováveis, provenientes do petróleo, bem como alguns aditivos químicos não renováveis, como biocidas, na formulação de fluidos de corte, para compostos ecologicamente corretos, como é o caso dos óleos essenciais de vegetais nativos, promovendo um processo mais sustentável. Essa alternativa não apenas contribui para a sustentabilidade, mas também incentiva o uso de vegetais nativos e apoia a agricultura familiar no cultivo dessas plantas.

2.5 Fluidos de corte a base de óleo vegetal e óleo essencial de plantas

Em busca de desenvolver fluidos de corte mais sustentáveis, reduzindo os seus possíveis impactos negativos, tanto aos trabalhadores quanto ao meio ambiente, tem se intensificado as pesquisas para a substituição de óleos de origem mineral por graxos, os quais incluem os extraídos de plantas, na composição desses produtos. Sobre o assunto, Souza *et al.* (2012) ressaltam que novos estudos vêm surgindo, com resultados que apontam para o potencial dos óleos vegetais em substituir os de origem mineral na produção de fluidos de corte para processos de usinagem, bem como a possibilidade de utilizar-se de óleos essenciais como aditivo, a fim de se obter propriedades específicas.

Sendo assim, cabe agora tratar um pouco sobre as principais características dos óleos vegetais e óleos essenciais de plantas. Sobre os óleos vegetais, Resende (2016) destaca que o reconhecimento das propriedades lubrificantes dos óleos vegetais aconteceu na década de 1960. Contudo, sua utilização não era disseminada, devido a necessidade de estabilização das emulsões. Por isso, os óleos vegetais eram, até então, utilizados, neste setor, em aplicações como óleos integrais. O autor salienta ainda que a maioria dos óleos vegetais, ao ser feita uma correlação com os óleos minerais, apresenta vantagens consideráveis, como o fato de serem mais compatíveis com a pele humana, baixa predisposição para a formação de vapor,

fumaça e, conseqüentemente, de entrar em combustão, já que possuem um ponto de fulgor¹ mais elevado.

De acordo com Kawazoe (2014), os óleos vegetais fazem parte do grupo chamado de óleo graxos, que são aqueles de origem animal e vegetal. Isso ocorre por que, tanto o vegetal como o animal são ricos em ácidos graxos, substâncias orgânicas pertencente ao grupo dos lipídios (ou gorduras). No caso dos óleos vegetais, eles podem ser obtidos em plantas oleaginosas, a exemplo da soja, girassol, milho, que possuem alta concentrações dessa substância em suas sementes. Apesar de suas similaridades, o óleo extraído de cada planta possui características que os tornam únicos, podendo ser empregue, portanto, para diferentes fins.

De acordo com Ferreira *et al.* (2022), os óleos vegetais são compostos por moléculas de triglicerídeos, as quais contém glicerol e ácidos graxos. A parte do glicerol é feita de três grupos de hidroxila e ácidos graxos, que consistem em uma longa cadeia de hidrocarbonetos, variando de 4 a 36 átomos de carbono com um grupo carboxila (COOH), ligado a cada grupo hidroxila. Já em relação aos ácidos graxos, eles podem surgir em três tipos em óleos vegetais, sendo eles os saturados, os monoinsaturados e os poli-insaturados.

Os saturados são caracterizados por possuírem apenas ligações de carbono simples, enquanto que os monoinsaturados têm uma ligação dupla entre os átomos de carbono e os poli-insaturados possuem mais de uma ligação dupla. O grau de saturação do óleo vegetal é medido com base na presença de ácidos graxos dominantes em sua composição. Quanto maior o grau de insaturação dos ácidos graxos de um óleo vegetal, mais susceptíveis à deterioração oxidativa, uma característica indesejável, principalmente para ligas de alumínio (SOUZA *et al.*, 2022).

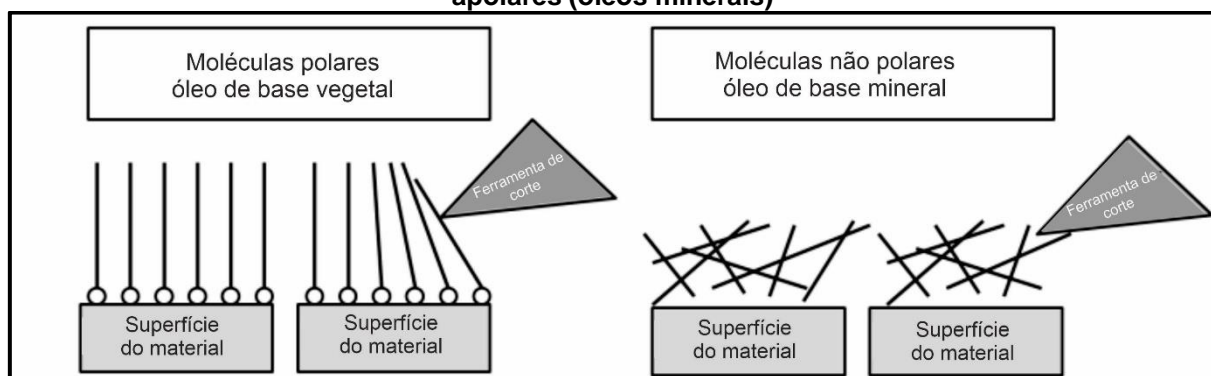
A obtenção dos óleos vegetais é feita, em sua maioria, por meio das sementes da planta, extraídos por métodos que podem envolver a pressão, uso de solventes ou a combinação dele, além de serem submetidos a uma série de tratamentos físicos e químicos para seu refino. Em geral, eles podem, em muitas aplicações, substituir os óleos a base de petróleo já que são ambientalmente menos nocivos, renováveis, menos tóxicos e facilmente biodegradáveis (RESENDE, 2016).

¹ O ponto de fulgor, ou ponto de inflamação, é a menor temperatura na qual um determinado líquido inflamável liberta vapor em quantidade suficiente para formar uma mistura inflamável, podendo entrar em combustão com a ação de uma fonte externa de calor.

O potencial lubrificante de um óleo é essencial para o desempenho dele na formulação de um fluido de corte, já que essa é uma característica básica deste tipo de insumo. De acordo com Adhvaryu, Erhan e Perez (2004), os óleos vegetais, em comparação com os óleos minerais, têm melhores propriedades lubrificantes devido a sua composição molecular e estrutura química. A característica polar das moléculas de óleos vegetais se alinha à superfície metálica, formando um filme lubrificante que pode suportar tensões consideráveis, reduzindo as forças de usinagem. As moléculas de triacilglicerol, base do óleo vegetal, se orientam com a extremidade polar voltada para a superfície do metal, produzindo, assim, uma estrutura em camadas.

Todo esse fenômeno, na prática, resulta em um filme superficial com potencial para inibir o contato metal-metal e a progressão de asperezas de sua superfície. A presença de um grupo polar com uma longa cadeia de hidrocarbonetos torna o óleo vegetal um surfactante anfifílico por natureza, permitindo que seja usado como um lubrificante de alta resistência ao atrito e ao desgaste (Figura 8). Por outro lado, eles apresentam menor capacidade de resistência a pressões extremas, em comparação com os óleos minerais (SYAHIR *et al.*, 2017).

Figura 8 - Alinhamento de moléculas polares (óleos vegetais) em comparação com moléculas apolares (óleos minerais)



Fonte: Soares (2020)

Corroborando com essa informação, Jorge (2009) ressalta que os óleos vegetais, por possuírem duplas ligações em sua estrutura, tem uma menor estabilidade oxidativa, gerando compostos insolúveis e, conseqüentemente, aumentando a viscosidade e a acidez do produto.

Tratando agora sobre as características do óleo essencial de plantas, é necessário entender o que é um óleo essencial e a sua diferença para os óleos vegetais, como o de algodão e mamona. De acordo com Nazarro *et al.* (2017), é

crescente o interesse recente em estudo de plantas na área dos óleos essenciais, devido as diversas propriedades medicinais e industriais que possuem, como, por exemplo, atividade antibacteriana e antifúngica.

De acordo com Reis *et al.* (2020), os óleos essenciais podem ser descritos como compostos naturais complexos, voláteis, lipofílicos e odoríferos, presentes em plantas aromáticas e que possuem diversas propriedades biológicas e funcionais, sendo responsáveis pelos diversificados odores que as plantas emanam. Quimicamente, são compostos por álcoois simples, terpenos, aldeídos, fenóis, cetonas, ésteres, óxidos, peróxidos, ácidos orgânicos, cumarinas, lactonas e compostos contendo enxofre, diferenciando-os dos óleos vegetais comuns, que são basicamente compostos de ácidos graxos.

De acordo com Cavalari e Oliveira (2017), os óleos essenciais também são chamados de óleos voláteis, óleos etéreos ou essências. Esses compostos possuem uma característica química de ser solúvel em solventes orgânicos apolares, como o éter, entretanto, a sua solubilidade em água pode ser limitada. Ainda, de acordo com Treviziani *et al.* (2019), os métodos de obtenção de óleos essenciais variam de acordo com a matriz da qual será extraído o óleo e os mais comuns são: destilação por arraste a vapor, enfloração, extração com solventes orgânicos, CO₂ supercrítico e prensagem.

Já Soares (2020) cita que os óleos essenciais são predominantemente constituídos de monoterpenos, sesquiterpenos, fenilpropanóides e ésteres. A essência forte e a natureza volátil desses óleos se devem ao seu processo de extração, geralmente por meio de arraste a vapor com matéria orgânica das folhas, raízes, frutos ou outras partes da planta que contenha maior quantidade da substância, facilmente identificável pelo aroma que exala.

Eles podem concentrar-se em órgãos vegetais específicos, como em folhas, ramos, raízes, rizomas, sementes, frutos, flores e caule. No entanto, como regra geral, a concentração da substância é maior em estruturas mais verdes, devido as vias metabólicas da fotossíntese. Não obstante, a taxa de concentração pode variar de acordo com a época do ano, idade da planta, clima e solo.

Uma das principais características dos óleos essenciais são suas propriedades antimicrobianas, agindo contra fungos, protozoários e vírus, o que pode ser explicado por serem substâncias ligadas ao sistema de defesa da planta, entre outras atividades biológicas (VIERA *et al.*, 2020). Assim, tais substâncias podem compor produtos que

exigem essa característica específica, como, por exemplo, fluidos de usinagem, ajudando na desinfecção de máquinas e ferramentas, sobretudo em atividades que exigem que as peças fabricadas não apresentem qualquer nível de contaminação.

Assim, após entender melhor sobre a composição dos óleos vegetais e óleos essenciais de plantas e o potencial de ambos como componentes para a elaboração de fluidos de corte, é necessário tratar especificamente sobre os óleos vegetais que serão utilizados na presente pesquisa, sendo eles o óleo de algodão, de mamona e o óleo essencial de melaleuca.

2.5.1 Óleo de algodão

O algodão é uma fibra vegetal esbranquiçada que cresce em volta das sementes de algumas espécies de algodoeiro (*Gossypium* L.), planta da família *Malvaceae*. Trata-se de uma espécie arbustiva, nativa de regiões tropicais e subtropicais, com período vegetativo variando entre 5 a 7 meses, conforme a quantidade de calor recebida, tendo preferências por climas quentes e úmidos. No Brasil, os estados que mais produzem algodão arbóreo (em caroço) são o Paraná, São Paulo e Bahia (COÊLHO, 2021). A Figura 9 apresenta uma plantação de algodoeiro.

Figura 9 - Plantação de algodoeiro



Fonte: Dantas (2022)

O algodão é uma matéria muito fibrosa e, embora seja macia, apresenta uma boa resistência a esforços de tração, o que permite sua utilização na confecção de

tecidos. Já as suas sementes são excelentes fontes de óleo e proteína de baixo custo para formulações alimentícias, com ácidos graxos e aminoácidos de alta qualidade. O óleo de algodão comercial é derivado das sementes de duas subespécies de algodoeiro, a *Gossypium hirsutum*, também conhecido como algodoeiro americano, e a *Gossypium barbadense* com o nome popular de algodoeiro egípcio, que são as espécies mais plantadas, dada a alta produção de fibra e de óleo (COÊLHO, 2021).

O óleo de algodão é considerado um material estável e que não necessita nenhuma medida de precaução para sua utilização, onde o risco de inflamabilidade é classificado como 1 (para materiais que apresentem o ponto de fulgor maior que acima de 93 °C), necessitando de uma grande quantidade de calor (NFPA, 2017). A Tabela 1 apresenta algumas características físico-químicas do óleo de algodão.

Tabela 1 – Características físico-químicas do óleo de algodão

Peso específico a 20 °C (g/cm³)	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)

Segundo Silva, Maia e Damasceno (2015), a obtenção do óleo de algodão se dá por meio de 3 etapas básicas, sendo elas: armazenamento das sementes oleaginosas; preparação da matéria prima; extração². Os autores também citam que o óleo de algodão possui diversas aplicações comerciais, sendo a principal como insumo para o preparo de alimentos, mas também é aplicado na indústria cosmética, farmacêutica e na produção de biodiesel.

² Extração de óleo por prensagem mecânica, geralmente realizada à quente. No processo de prensagem mecânica, é eliminado uma quantidade de óleo bruto da polpa e, simultaneamente, é formado uma torta rica em óleo. Essa torta é então encaminhada para a etapa de extração por solvente (hexano), que resultará na retirada do óleo que está presente nesta torta.

O estudo de Jacobina, Fraga e Neto (2016) destaca essa última possibilidade, ressaltando que o óleo de algodão pode ser utilizado para produção de biodiesel, sobretudo em composição com outros tipos de óleo, como o de soja e o de milho, gerando um combustível de alta qualidade. Além disso, a pesquisa de Borges *et al.* (2022) destaca as propriedades lubrificantes do óleo de algodão, podendo ser utilizado, portanto, como biolubrificantes ou na composição de outros produtos que necessitam desta característica, tendo como principal vantagem o fato de ser renovável e não agredir o meio ambiente ao ser descartado e possuir propriedades semelhantes ao óleo mineral.

2.5.2 Óleo de mamona

A mamona (*Ricinus communis* L.), também conhecida como pé-de-mamona, mamoneira e carrapateira, é uma planta da família das euforbiáceas, tendo origem na Ásia meridional. O principal produto gerado pela mamona é o seu óleo, também conhecido como óleo de rícino, extraído de suas sementes. Soares (2013) discorre que o óleo de mamona é utilizado nas mais variadas indústrias como lubrificante, sendo o único óleo vegetal naturalmente hidroxilado, em escala comercial.

Figura 10 - Mamoneira



Fonte: Ribeiro (2022)

Essa propriedade advém do fato de que suas moléculas são formadas por uma hidroxila (OH), em ligação na cadeia de carbono, algo que, em escala comercial, é o único óleo que possui de forma natural. Essa característica é altamente desejável na indústria química, já que ele pode ser utilizado como base para a produção de

hidróxido de sódio (fabricação de papel, tecidos, detergentes, alimentos e biodiesel) e hidróxido de potássio (fertilizante) (SOARES, 2013).

Outra característica relevante do óleo de mamona é o fato de ser composto predominante (entre 80 a 90%) por um único ácido graxo, o ácido ricinoleico, o que lhe confere propriedades químicas atípicas, como uma alta viscosidade e solubilidade em álcool a baixa temperatura. Em relação as desvantagens, pode-se citar com a principal a sua baixa estabilidade a oxidação, assim como a grande maioria dos óleos vegetais (SOUA JUNIOR *et al.*, 2022).

Campos e Santos (2015) relata que o óleo da mamona tem 30% mais lubricidade do que os demais óleos vegetais e que este pode substituir o enxofre, por exemplo, em uma porcentagem de 100% no diesel mineral, sendo considerado então, no mercado, como um óleo especial. Sousa Júnior *et al.* (2022) afirmam que o óleo de mamona pode ser utilizado para diversos fins, como, por exemplo, para a fabricação de tintas e isolantes, lubrificantes, na manufatura de cosméticos, medicamentos farmacêuticos e em outros processos industriais.

Soares (2013) aponta que, mesmo que o óleo de mamona seja um excelente óleo lubrificante, ele tem a desvantagem principal de sua baixa estabilidade à oxidação. Ressalta ainda que essa substância possui como uma das principais características a sua alta viscosidade e baixo coeficiente de atrito, além de ser um dos únicos óleos graxos que apresenta solubilidade em álcool, mas não em óleos minerais, devido à presença do grupamento hidroxila em sua estrutura. Algumas propriedades físico-químicas são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Características típicas de óleo de mamona

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 Iodo	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)

Em relação a extração do óleo de mamona, este processo pode ser feito por prensagem a frio/a quente ou com o uso de solventes, sendo que em quaisquer desses processos, são utilizadas as sementes já secas da planta. No processo de prensagem a frio, em que as sementes são prensadas em temperatura ambiente, é gerado um óleo de pureza elevada, ideal para fins cosméticos e medicinais. Já a prensagem a quente, em que as sementes são aquecidas, obtém-se uma maior quantidade de óleo, entretanto, com mais impurezas. Por fim, na extração por solvente, utiliza-se as chamadas “tortas residuais” dos processos de prensagem, utilizando-se etanol ou hexano como solvente (CAMPOS; SANTOS, 2015).

2.5.3 Óleo essencial de melaleuca

A melaleuca, de acordo com Assis (2017), é uma espécie arbórea pertencente à família *Myrtaceae*, de ampla ocorrência na América Tropical, e *Leptospermoideae*, na Austrália, Malásia e Polinésia. O óleo essencial de melaleuca foi obtido pela primeira vez em 1925, por Arthur Penfold, curador do Museu Australiano de Artes e Ciências Aplicadas, que o destilou e também avaliou suas propriedades germicidas, afirmando que o mesmo possui ampla ação bacteriana e antifúngica (OLIVEIRA *et al.*, 2015).

No presente estudo, foi utilizado o gênero *Melaleuca alternifolia*, conhecida como *tea tree*, ou seja, árvore do chá. A árvore possui uma estatura alta, casca fina e folhas longas que, quando são partidas, exalam um forte aroma, devido a presença de óleo essencial em grande quantidade. Elas florescem principalmente em áreas de pântano e próximas de rios, atingindo cerca de sete metros de altura, sendo cortadas após 15 meses do cultivo e recortadas a cada ano, com um crescimento rápido (NEPOMOCENO; PIETROBON, 2020).

Figura 11 – Plantação de *Melaleuca alternifolia* (à esq.) e partes aéreas da planta picadas (à dir.)



Fonte: Trópicos (2023)

A extração do óleo essencial de melaleuca é feita, geralmente, por arraste a vapor ou por hidrodestilação das folhas. Em relação as propriedades do óleo essencial de melaleuca, Silva *et al.* (2019) argumentam que ele possui diversas propriedades terapêuticas, podendo ser utilizado como cicatrizante e antimicrobiano, além de ser cientificamente comprovada a sua eficácia para o tratamento de doenças infecciosas, como a candidíase e herpes simplex. No âmbito industrial, além da sua clara função na composição de cosméticos e medicamentos fitoterápicos, o óleo de melaleuca também pode ser adicionado na composição de diferentes insumos, a exemplo de fluidos de corte, para atuar como agente bactericida.

Um agente bactericida em um fluido de corte possui diversas funções, como impedir o crescimento bacteriano no próprio fluido e, conseqüentemente, de passar tais microrganismos para a peça a ser usinada, garantir a integridade do fluido, já que o crescimento bacteriano pode comprometer a sua eficácia devido a formação de resíduos orgânicos, reduzir odores desagradáveis, o que, ao final, contribui para a qualidade do produto final (SILVA *et al.*, 2019).

A escolha pelo óleo essencial de melaleuca como agente bactericida para a formulação dos fluidos de cortes no presente estudo se deu por se tratar de uma componente cuja atividade antimicrobiana vem sendo testada em atividades industriais, como é o caso da formulação de fluidos de corte, além de ser de fácil aquisição de relativo baixo custo.

A Tabela 3 apresenta algumas características do óleo essencial de melaleuca.

Tabela 3 – Características físico-químicas do óleo essencial de melaleuca

Peso específico a 20 °C (g/cm ³)	0,889
Valor de lodo	85
Índice de saponificação (mg/KOH)	180
Índice de Acidez (mg KOH/g)	6,39
Ponto de Fulgor (°C)	220

Fonte: Silva *et al.* (2019)

Após entender melhor sobre os óleos vegetais de algodão e mamona, além do óleo essencial de melaleuca, é preciso tratar sobre o funcionamento do tribômetro, conforme é apresentado no próximo tópico.

2.6 Tribômetro pino-disco e suas aplicações

De maneira geral, um tribômetro é um equipamento destinado à realização de ensaios de atrito e desgaste. Os ensaios de desgaste podem ser divididos em dois grupos distintos, sendo eles os fenomenológicos, que focam em uma situação particular de desgaste (abrasão, corrosão, fadiga, etc.) e os operacionais, que testam um dispositivo como um todo, a exemplo da análise de durabilidade de um virabrequim de um motor a combustão (BAYER, 2004).

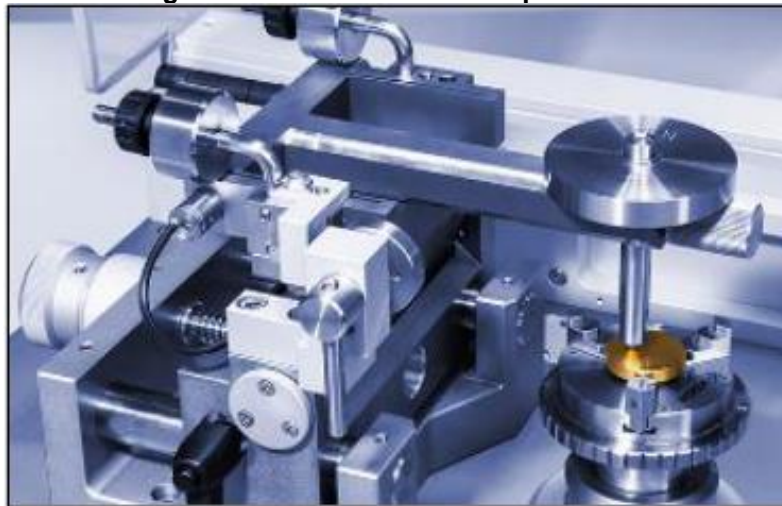
No caso do presente trabalho, o teste de desgaste se qualifica como fenomenológico, aplicado com o objetivo de entender o potencial de emulsões à base de óleos de algodão, mamona e óleo essencial de melaleuca. Para esse tipo de teste, é possível utilizar-se de diferentes equipamentos, como o ensaio de desgaste Bloco-Disco, de Quatro Esferas e o teste Pino-Disco, sendo este o escolhido, devido a disponibilidades, para essa pesquisa.

Segundo Martins (2017) o método do pino-disco é baseado na aproximação de um pino a um disco em rotação, de onde resultará uma pista de desgaste no disco, o que permite a análise das forças de atrito desenvolvidas em diferentes materiais quanto entram em contato e em movimento. É possível variar o diâmetro do pino, a carga aplicada e a posição relativa do pino ao centro do disco, de modo a obter resultados mais próximos da aplicação ao qual o ensaio se propõe. Já no disco, é

possível alterar a velocidade de rotação, através de um variador de tensão no motor elétrico.

Os equipamentos de pino-discos são aptos para trabalhar a seco ou em contato com lubrificantes, permitindo, então, o estudo da variação do desgaste gerado com diferentes substâncias, mantendo-se todos os demais parâmetros, do modo que se propõe a presente pesquisa. A aquisição dos dados é feita por um *software*, por meio de um computador auxiliar. A Figura 12 evidencia um modelo de tribômetro do tipo “pino sobre disco”, ou apenas pino-disco.

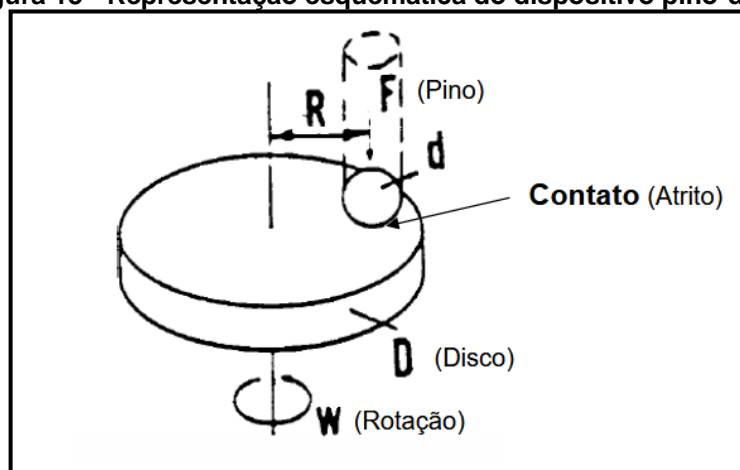
Figura 12 - Modelo tribômetro pino-disco



Fonte: Martins (2017)

Desta maneira, pode-se dizer que o ensaio tribológico do tipo pino-disco tem por finalidade determinar o desgaste provocado pelo deslizamento de contato com áreas reduzidas, contendo ou não uma substância sobre a superfície do disco, que no caso, é o corpo-de-prova. A Figura 13 ilustra o funcionamento do dispositivo.

Figura 13 - Representação esquemática do dispositivo pino-disco



Fonte: Verdi (2011)

No ensaio realizado por meio de tribômetro pino-disco, a determinação do desgaste é dada pela análise da perda de massa ou da variação das medidas do disco e do pino, por meio de aferições realizadas antes e após o teste. Geralmente, a superfície de contato do pino é feita de material mais duro (ligas de tungstênio, aço de alta dureza com revestimento) do que o disco, ou corpo-de-prova, fazendo com que o desgaste ocorra de maneira mais acentuada na superfície do mesmo. Além disso, tais medições são influenciadas pela combinação de alguns fatores, como força aplicada, velocidade de deslizamento, distância percorrida, o meio de realização do teste e também a propriedade do material testado (BRESSAN; GILAPA; DAROS, 2013).

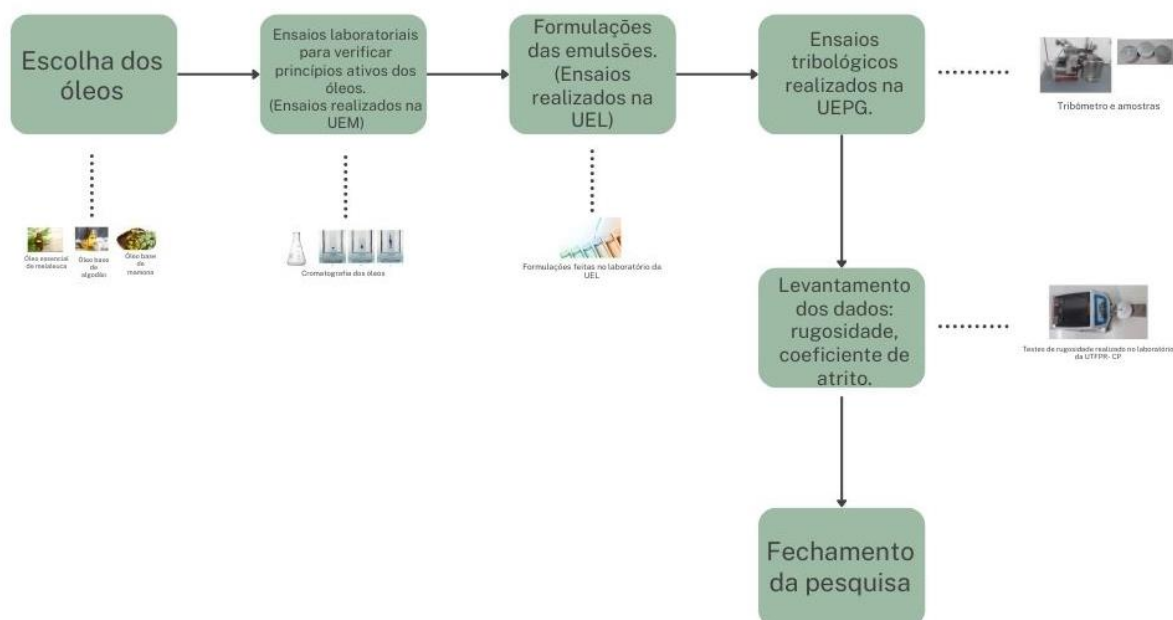
As características dos sistemas reais, como meio corrosivo, temperatura, lubrificação e geometria, podem levar o teste a resultados distantes dos valores reais, logo, é necessário simular o maior número possível de variáveis. Por fim, cabe salientar que é possível adotar algumas normas para a realização do teste de pino-disco, sendo que, dentre as principais, destaca-se a elaborada pela Sociedade Americana para Testes e Materiais (em inglês: *American Society for Testing and Materials*) – ASTM, chamada de ASTM G99 – *Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus*, ou método de teste padrão para teste de desgaste em aparelho pino-disco (ASTM, 2017).

A norma traz os principais procedimentos a serem adotados em testes pino-disco para a determinação do desgaste e do coeficiente de atrito durante o deslizamento. Para o presente estudo, será utilizado os parâmetros e equações indicadas pela ASTM G99 para os cálculos da perda de volume e coeficiente de desgaste, o que será melhor explicado no próximo capítulo.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo trata sobre os procedimentos, materiais e técnicas utilizadas para a realização dos ensaios e obtenção dos resultados de pesquisa. Inicialmente será apresentada a preparação do tribômetro para a realização do teste, com a adaptação de um copo. Em seguida, será informado sobre os processos de preparo das emulsões com óleo vegetal de mamona, algodão e óleo essencial de melaleuca, as etapas para a realização dos ensaios, com a preparação dos corpos-de-prova (discos) e, por fim, apresenta-se os cálculos para encontrar o volume perdido em função da massa e o coeficiente de desgaste. Na Figura 14 é apresentado um fluxograma das etapas para a execução dos testes e obtenção dos resultados.

Figura 14 – Fluxograma dos procedimentos metodológicos



Fonte: Autoria própria (2022)

3.1 Preparação do tribômetro

Os ensaios foram desenvolvidos no laboratório C-LABMU, da Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG). Foi utilizado o tribômetro pino-disco, modelo *HIGH Temperature Tribometer*, da instituição, apresentado na Figura 15.

Figura 15 – Tribômetro HIGH Temperature Tribometer

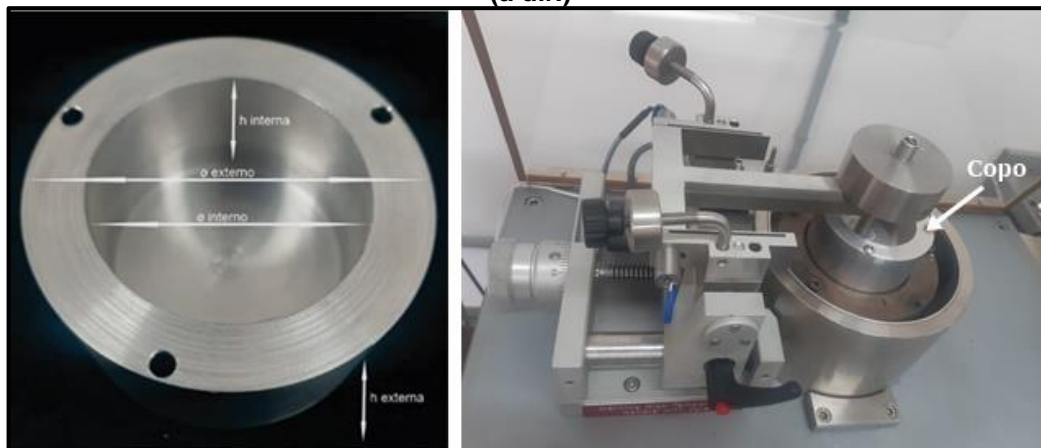


Fonte: Acervo pessoal (2022)

Pensando em melhorar a eficiência dos ensaios de desgaste, foi realizada uma adaptação no tribômetro para incluir um copo, feito de liga de Alumínio 6061, o mesmo material utilizado para o teste, de diâmetro externo e interno menor ao original do equipamento, a fim de acomodar os discos de testes. A intenção com essa adaptação é a de manter as emulsões testadas sob o disco de maneira mais uniforme, com o copo de alumínio impedindo como que as soluções se espalhassem e ficassem fora da área de contato entre as superfícies do disco e do pino.

Para realizar tal adaptação, contou-se com o auxílio dos funcionários do C – LABMU – Complexo de laboratórios multiusuários da UEPG. As medidas utilizadas para a fabricação do copo de adaptação foram: 74,81 mm de diâmetro externo; 51,59 mm de diâmetro interno; 38,31 mm de altura externa, e; 28,51 mm de altura interna. A Figura 16 apresenta o copo de alumínio desenvolvido para a adaptação no tribômetro (à esquerda) e o copo já instalado no equipamento (à direita). As amostras foram presas ao copo utilizando-se cola quente, fixando o fundo das amostras com o do copo.

Figura 16 – Dimensões do copo adaptado (à esq.) e copo adaptado instalado no equipamento (à dir.)



Fonte: Acervo pessoal (2022)

3.2. Preparo das emulsões com os óleos vegetais de algodão e mamona e óleo essencial de melaleuca

Vale ressaltar que os óleos de algodão e mamona desempenham o papel de substituir o óleo mineral de base petróleo na formulação dos fluidos de corte, atuando como óleos base. Por outro lado, o óleo essencial de melaleuca foi utilizado como agente biocida no lubrificante.

Portanto, optou-se por avaliar as propriedades mecânicas das novas formulações por meio de um tribômetro. Essa escolha foi feita devido ao menor volume de amostra necessário para os testes, evitando desperdícios, e também para preservar a integridade da máquina, em vez de utilizar uma máquina-ferramenta comercial.

Para os ensaios que foram realizados no tribômetro, foram desenvolvidas seis emulsões contendo diferentes formulações a base de óleo vegetal de mamona e algodão (características lubrificantes) e óleo essencial de melaleuca (atividade antimicrobiana), além de outros insumos, como água destilada (refrigeração, solvente), nanopartícula de prata (atividade antimicrobiana, lubrificante sólido), propilenoglicol (resfriamento e lubrificação) e Tween 80 (emulsificante).

Os fluidos foram formulados no laboratório de química, do Centro de Ciências Biológicas, da Universidade Estadual de Londrina (UEL). Para a produção das emulsões, foram seguidas as diretrizes do próprio laboratório, conforme traz a Figura

17. Cabe salientar que tais formulações são objeto de pesquisa do referido laboratório, sendo utilizados como referência para a realização da presente pesquisa.

Figura 17 – Recomendações para formulação de fluidos de corte com o uso de óleos vegetais pelo Laboratório de Química do Centro de Ciências Biológicas da UEL

Ensaio/formulação	1	2	3	4	5	6
Água destilada	35-40%	35-40%	---	---	---	---
Óleo essencial	---	1-5%	1-5%	---	1-5%	1-5%
Óleo vegetal de algodão	---	---	1-2%	1-2%	---	3-5%
Óleo vegetal de mamona	1-5%	1-5%	---	---	1-2%	---
Nanopartícula de prata	---	1-5%	1-5%	---	1-5%	1-5%
Propilenoglicol	44-48%	35-40%	86-90%	90-95%	86-90%	80-85%
Tween 80	5-10%	5-10%	1-5%	1-5%	1-5%	1-5%

Fonte: Laboratório de Química do Centro de Ciências Biológicas da UEL (2022)

Sobre a lógica das soluções propostas, a água destilada é utilizada como solvente da solução, além de possuir propriedades refrigerantes. As concentrações propostas para os óleos vegetais de mamona e algodão encontram-se na faixa em que conseguem conferir uma boa capacidade lubrificante à emulsão. O óleo essencial de mamona, na faixa de concentração sugerida na emulsão, é capaz de conferir atividade antimicrobiana.

As nanopartículas de prata são componentes amplamente utilizados na formulação de fluidos de corte, pois atuam como agentes antimicrobianos e lubrificantes sólidos. Elas se ligam às saliências da superfície do material, tornando-o menos rugoso. O tween 80 é um agente surfactante que possui características anfifílicas, ou seja, parte da sua molécula é polar e parte é apolar. Isso permite que ele interaja tanto com materiais hidrofílicos quanto hidrofóbicos, tornando a emulsão de água e óleo mais estável e evitando a separação de fases entre a parte hidrofóbica e hidrofílica.

Por fim, o propilenoglicol é outro composto químico amplamente utilizado em fluidos de corte, desempenhando diversas funções, principalmente o resfriamento, a prevenção contra corrosão em emulsões, a redução na formação de névoa e fumaça, além de conferir estabilidade ao fluido, evitando sua decomposição e aumentando sua vida útil.

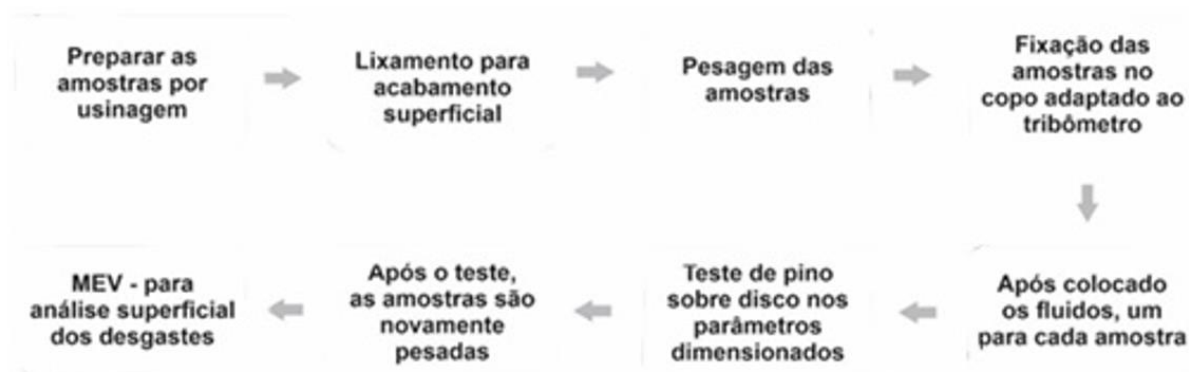
Com base em tais diretrizes, foram produzidos 6 tipos de emulsões, sendo que cada uma foi ensaiada com o seu respectivo disco, formando a amostra (disco e fluido). A amostra 1 utilizou o fluido denominado de Fluido 4CLT, composto por 46% de propilenoglicol, 5% de óleo de mamona, 10% de tween 80, 39% de água destilada. Na segunda amostra foi utilizado o Fluido 4, composto por 39% de propilenoglicol, 2% de óleo de melaleuca, 5% de óleo de mamona, 5% de nanopartícula de prata, 10% de tween 80 e 39% de água destilada. A terceira amostra utilizou o Fluido 18 Biocida, formulado com 87% de propilenoglicol, 2% de óleo de algodão, 1% de óleo essencial de melaleuca, 5% de nanopartícula de prata e 5% de tween 80. Já na quarta amostra foi aplicado o Fluido 18 CTL, composto por 93% de propilenoglicol, 2% de óleo de algodão, 5% de tween 80.

Na quinta amostra usou-se o Fluido 13 Biocida, foi composto por 87% de propilenoglicol, 1% de óleo essencial de melaleuca, 2% de óleo de mamona, 5% de nanopartícula de prata e 5% de tween 80. A sexta amostra utilizou o Fluido 10 Biocida, que consiste em 85% de propilenoglicol, 2% de óleo de mamona, 3% de óleo de algodão, 5% de nanopartícula de prata e 5% de tween 80. Além dos fluidos desenvolvidos, também foi realizado um teste com um fluido de corte comercial e um teste a seco, sem fluido.

3.3 Ensaio tribológico

A sequência de ações para realização dos ensaios tribológicos foi dividida em algumas etapas, as quais são apresentadas esquematicamente na Figura 18.

Figura 18 – Fluxograma de ações para a realização do ensaio tribológico pino-disco



Fonte: Autoria própria (2022)

Conforme é apresentado no fluxograma, o primeiro passo para a realização do ensaio foi a preparar os corpos-de-prova, isto é, os discos, que foram utilizados no teste de desgaste. Cada um dos corpos de prova foi usinado a partir de um mesmo tarugo de liga de Alumínio 6061, sendo essa uma liga de Alumínio bastante utilizada e que possui diversas aplicações e que tem como principal característica a sua resistência a elevadas tensões, permitindo a sua aplicação na construção naval, de veículos, de equipamentos elétricos, de rebites e de peças de precisão (HIGUEIRA-COBOS; FLOREZ-GARCIA; PEDRAZA-YEPES, 2019). As principais características físico-químicas dessa liga de alumínio, obtidas por meio da literatura, são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Propriedades físico-químicas da liga de alumínio 6061

Liga de Alumínio 6061								
Composição (%)	Mg	Fe	Cu	Mn	Al	Si	Zn	Ti
		0,8 - 1,2	0 - 0,7	0,15 - 0,4	0 - 0,15	Restante	0,4 – 0,8	0 – 0,25
Propriedades Físicas	Densidade		Dureza		Ponto de Fusão		Módulo de elasticidade	
	2,71 g/cm ³		95 HB		580 – 650°C		69 GPa	

Fonte: Indusmart (2023)

Após a usinagem, foi realizado o lixamento da superfície dos discos, para melhor acabamento superficial, de modo a contribuir para análise via MEV após o ensaio tribológico, sendo utilizadas lixas de granulometria 600 e 1200, respectivamente. Após o processo de preparo das superfícies, cada um dos discos foi pesado em uma balança de precisão modelo AY220, com medida máxima de massa de 220 gramas e mínima de 0,01 grama. Neste momento, eles foram identificados para receber cada um dos fluidos desenvolvidos para o estudo.

Assim, cada uma das amostras foi fixada no equipamento, junto com seu respectivo fluido de teste, dando início ao mesmo, que teve duração média de 10 minutos, cada. Após o teste, as amostras foram limpas e pesadas novamente na balança de precisão, a fim de verificar se houve uma redução de massa. Em seguida, as amostras foram analisadas por meio de MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura), a fim de analisar a superfície desgastada.

Os ensaios foram realizados com tempo, carga, velocidade e quantidade de fluido constante. Para cada ensaio, foi realizado um ensaio e uma réplica, de modo verificar se houve variações significativas entre os resultados, que podem ocorrer por interferência externa (mudanças de temperatura, presença de sujeira na superfície do corpo-de-prova, etc.). Caso detectado uma diferença significativa, seria realizado um novo teste, a fim de corroborar com um dos resultados obtidos.

Os testes foram feitos mediante consulta bibliográfica e condições do equipamento, considerando a capacidade do mesmo e no intuito mimetizar, ao máximo, uma situação real de desgaste por atrito em um processo de usinagem. Os parâmetros utilizados no ensaio tribológico pino-disco são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Parâmetros utilizado no ensaio tribológico

Raio	Distância	RPM	Força
5 mm	50 m	152,7887	5 N

Fonte: Autoria própria (2022)

A força utilizada no ensaio foi de escolhida de acordo com as condições do próprio ensaio adaptado, pois dependia da fixação das amostras no copo adaptado. A esfera da ponta do pino, superfície que entrou em contato com a do disco, é feita de carboneto de tungstênio, um material consideravelmente mais duro que o utilizado para a fabricação dos discos (entre 1200 a 1400 HV), fazendo com que o desgaste seja mais acentuado nos mesmos. O diâmetro da esfera da ponta do pino é de 5 mm. Para o procedimento de MEV, os ensaios foram feitos sob supervisão da técnica do laboratório do Complexo de Laboratórios Multiusuários da Universidade de Ponta Grossa.

3.4 Cálculo da perda de volume e coeficiente de desgaste

Para realizar o cálculo da perda de volume e o coeficiente de desgaste, foram utilizadas as equações sugeridas pela norma ASTM G99 - Método de teste padrão para teste de desgaste em aparelho pino-disco. Segundo a norma, existem diferentes caminhos para se chegar à perda de volume no corpo de prova (disco) em ensaios de desgaste deste tipo, sendo que, para o presente trabalho, será calculado a perda de

volume em função da variação de massa antes e após o ensaio, obtido por meio da Equação 3.1 (ASTM, 2017).

$$V = \frac{\Delta m}{\rho} \quad (3.1)$$

Em que:

V = Volume perdido (cm³);

Δm = Diferença entre a massa antes e após o teste (g);

ρ = Densidade do material usado para o teste (g/cm³).

Com o valor da perda de volume, é possível calcular, com mais algumas informações do material e das condições de ensaio, o coeficiente de desgaste, como mostra a Equação 3.2 (ASTM, 2017).

$$k = \frac{H.V}{P.L} \quad (3.2)$$

Em que:

k = Coeficiente de desgaste (mm³/N.m);

H = Dureza Brinell (HB);

P = Carga do Pino (N);

L = Distância percorrida (m);

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Conforme mencionado, o estudo fora realizado por meio de análise tribológica com ensaio pino-disco, uma vez ele permite entender o comportamento do atrito, do desgaste e da lubrificação das superfícies em contato e que interagem em um movimento relativo. As amostras em questão foram submetidas aos ensaios, realizado sobre os mesmos padrões, a fim de realizar um levantamento mais preciso. A velocidade utilizada nos ensaios foi de 152,7887 rpm, ou 2,5465 Hz, percorrendo uma distância de 50 metros.

Cabe salientar que, para cada um dos resultados das amostras, foi realizado um ensaio e uma réplica, não sendo identificado variações significativas, sendo adotado como resultado oficial o ensaio em que houve maior variação entre a massa antes e após o teste. A Tabela 6 apresenta as amostras com seu respectivo fluido de teste, diâmetro, altura e massa do disco.

Tabela 6 – Identificação das amostras com os fluidos para o ensaio tribológico, além de seu diâmetro e altura

	Denominação	Diâmetro	Altura	Massa inicial
Amostra 1	Fluido 4CTL	31,11 mm	10,12 mm	20,8436 g
Amostra 2	Fluido 4	31,20 mm	10,08 mm	20,7935 g
Amostra 3	Fluido 18 Biocida	31,16 mm	10,02 mm	20,5367 g
Amostra 4	Fluido 18 CTL	31,17 mm	10,22 mm	20,9160 g
Amostra 5	Fluido 13 Biocida	31,16 mm	10,20 mm	20,8487 g
Amostra 6	Fluido 10 Biocida	31,20 mm	10,10 mm	20,7458 g
Amostra 7	Fluido comercial	31,18 mm	10,17 mm	20,8737 g
Amostra 8	Sem fluido	30,96 mm	10,21 mm	20,8193 g

Fonte: Autoria própria (2022)

Assim, serão apresentados os resultados do coeficiente de desgaste e da análise visual do desgaste via MEV em cada uma das amostras, a partir dos fluidos de corte utilizados.

4.1 Análise da perda de volume por massa e do coeficiente de desgaste das amostras

Conforme citado, ao fim de cada ensaio, as amostras foram pesadas, a fim de se obter a diferença de massa antes e após o teste. A Tabela 7 apresenta os resultados obtidos de perda de massa em cada uma das amostras.

Tabela 7 - Análise de perda de massa das amostras

	Massa inicial	Massa final	Diferença massa
Amostra 1	20,8436 g	20,8428 g	0,0008 g
Amostra 2	20,7935 g	20,7932 g	0,0003 g
Amostra 3	20,5367 g	20,5313 g	0,0054 g
Amostra 4	20,9160 g	20,9127 g	0,0033 g
Amostra 5	20,8487 g	20,8440 g	0,0047 g
Amostra 6	20,7458 g	20,7408 g	0,0050 g
Amostra 7	20,8737 g	20,8686 g	0,0051 g
Amostra 8	20,8193 g	20,7108 g	0,1085 g

Fonte: Autoria própria (2022)

Com base nessas informações, e utilizando das demais já citadas, como as características físico-químicas da liga de alumínio 6061 utilizada (dureza e densidade) e os parâmetros de teste (distância percorrida e carga do pino), é possível aplicar as equações 3.1 e 3.2 para encontrar, respectivamente, o volume perdido em função da diferença de massa e a taxa de desgaste de cada uma das amostras. A Tabela 8 apresenta os parâmetros iniciais para os cálculos da perda de volume o coeficiente de desgaste de cada uma das amostras.

Tabela 8 – Parâmetros iniciais para os cálculos da perda de volume e coeficiente de desgaste das amostras

Parâmetros Iniciais	
Densidade do material (ρ)	2,71 g/cm ³
Dureza Brinnel do material (H)	95 HB
Carga do Pino (P)	5 N
Distância percorrida (L)	50 m

Fonte: Autoria própria (2022)

Assim, com base nessas informações, foi utilizado o *software* Microsoft Excel®, para a realização dos cálculos, cujo os resultados são apresentados na Tabela 9.

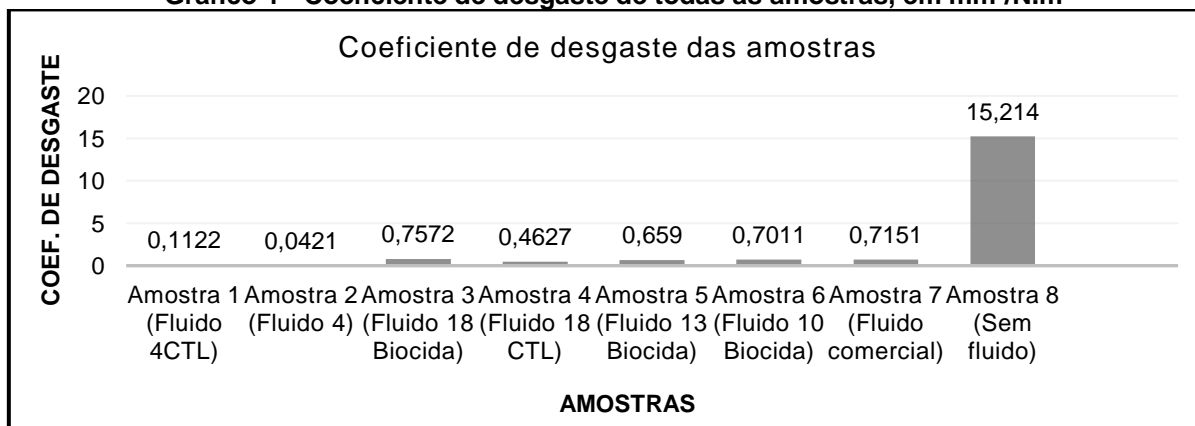
Tabela 9 – Volume perdido, em mm³, e coeficiente de desgaste, em mm³/N.m, de cada uma das amostras ensaiadas com seus respectivos fluidos

Amostra	Diferença de massa Δm (g)	Volume perdido V (mm ³)	Coeficiente de desgaste k (mm ³ /N.m)
Amostra 1	0,0008	0,2952	0,1122
Amostra 2	0,0003	0,1107	0,0421
Amostra 3	0,0054	1,9926	0,7572
Amostra 4	0,0033	1,2177	0,4627
Amostra 5	0,0047	1,7343	0,6590
Amostra 6	0,0050	1,8450	0,7011
Amostra 7	0,0051	1,8819	0,7151
Amostra 8	0,1085	40,0369	15,2140

Fonte: Autoria própria (2022)

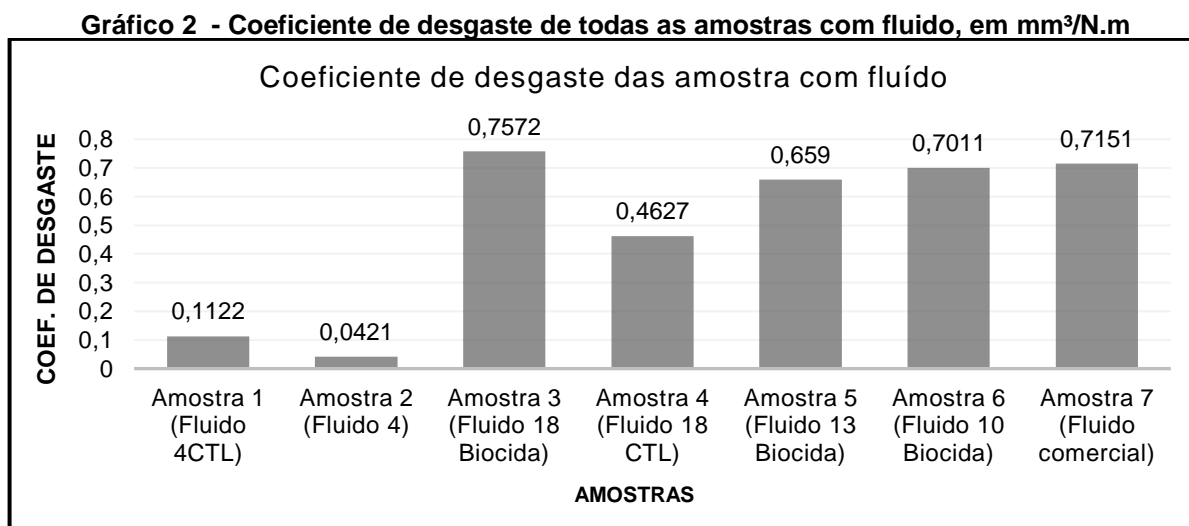
Primeiramente, pode-se dizer, com base nos resultados, que o volume perdido é diretamente proporcional ao coeficiente de desgaste, uma vez que todos os parâmetros de ensaio (velocidade, distância percorrida, carga aplicada, material utilizado para a fabricação dos corpos de prova) são iguais, mudando apenas o fluido. Assim, os resultados serão analisados com base no coeficiente de desgaste apenas. O Gráfico 1 apresenta os resultados do coeficiente de desgaste de cada uma das amostras.

Gráfico 1 - Coeficiente de desgaste de todas as amostras, em mm³/N.m



Fonte: Autoria própria (2022)

Como pode ser visto, o coeficiente de desgaste da amostra 8 ($k = 15,214 \text{ mm}^3/\text{N.m}$), em que foi realizado o ensaio a seco, é consideravelmente maior do que as demais, demonstrando que todos os fluidos ensaiados, em algum nível, conseguiram reduzir o desgaste no corpo-de-prova. Agora, para melhor visualização, o Gráfico 2 apresenta os resultados apenas das amostras que utilizaram algum fluido, excluindo a ensaiada a seco.



Fonte: Autoria própria (2022)

Como pode ser observado no Gráfico, o menor coeficiente de desgaste foi obtido na amostra 2 ($k = 0,0421 \text{ mm}^3/\text{N.m}$), em que se utilizou o Fluido 4, composto de 39% de propilenoglicol, 2% de óleo de melaleuca, 5% de óleo de mamona, 5% de nanopartícula de prata, 10% de tween 80 e 39% de água destilada. Já o pior resultado foi alcançado na amostra 3, com o Fluido 18 Biocida, formulado com 87% de propilenoglicol, 2% de óleo de algodão, 1% de óleo essencial de melaleuca, 5% de nanopartícula de prata e 5% de tween 80.

Antes de compreender esses resultados, é preciso entender que o teste pino sobre disco, de acordo com Bourithis, Papadimitrou e Sideris (2006) é um ensaio que investiga, principalmente, dois tipos de mecanismos de desgaste, o abrasivo e o adesivo, sendo que ambos estão intrinsecamente ligados. O desgaste por abrasão pode ocorrer de duas formas: deslizamento (dois corpos) e rolamento (três corpos).

Assim, durante o ensaio, ocorre a abrasão por deslizamento, que, por sua vez, auxilia no mecanismo de adesão, retirando material da superfície do corpo de prova. Esse material aderido ao pino, que é a superfície mais dura, pode se desprender e,

por sua vez, dar início ao desgaste abrasivo por deslizamento, além das próprias impurezas que podem estar sob a superfície de teste (BOURITHIS; PAPADIMITROU; SIDERIS, 2006).

Ambos os mecanismos de desgaste estão ligados com o atrito, o qual é atenuado com o uso de lubrificantes, já que eles formam uma fina camada superficial sobre o material, impedindo ou reduzindo o contato entre as superfícies dos materiais (RIBEIRO FILHO *et al.*, 2015). Assim, pode-se afirmar que, nas amostras em que o coeficiente de desgaste foi menor, o fluido possui melhor capacidade lubrificante, mas também, refrigerante, já que o atrito produz calor e o mesmo afeta a viscosidade do fluido, o que, por sua vez, acarreta em uma redução da lubrificação que gera.

Com isto posto, é possível entender melhor os resultados encontrados nos ensaios. Neste ponto, é necessário apontar que os dois melhores resultados foram obtidos nas amostras 2 e 1 (Fluido de 4CLT), respectivamente, sendo os que utilizaram a maior concentração de óleo de mamona em sua composição. A amostra 2, que obteve o melhor resultado, também continha óleo essencial de melaleuca e nanopartículas de prata.

Em relação a capacidade lubrificante do óleo de mamona, Farias *et al.* (2021), em estudo sobre a possibilidade de utiliza-lo na síntese de biodiesel e biolubrificantes, afirmam que ele é uma boa opção para tais fins, uma vez que se trata de um ácido graxo saturado com baixa acidez e alta viscosidade. Em estudo sobre a viabilidade de aplicação comercial do mesmo, os autores salientam que ele pode ser usado em sua forma bruta como biolubrificantes ou como aditivo para a produção de insumos que necessitam dessa característica.

Cabe salientar que o óleo de mamona é uma substância reconhecida pela sua capacidade de compor fluidos de corte, sendo que, a partir dela, foi criado o primeiro óleo vegetal de corte, em uma pesquisa realizada na Universidade de São Paulo (USP), campus de São Carlos. De acordo com Reynol (2009), a escolha pelo óleo de mamona para a produção deste óleo de corte se deu pelo fato de ele manter a sua capacidade lubrificante em alta pressão, sem exigir aditivos, sendo essa a principal aplicação dos óleos como fluido de corte.

Para além das qualidades do óleo de mamona, outros pontos podem ter influenciado no melhor desempenho das amostras 1 e 2, como o fato de serem os únicos fluidos testados com água destilada em sua composição e menor teor de propilenoglicol. De acordo com Medeiros, Barbosa e Fontes (2010) propilenoglicol é

um composto orgânico (álcool diol) com alta capacidade refrigerante e diversas aplicações na indústria. Entretanto, com base nos resultados obtidos, a sua alta concentração pode reduzir a lubricidade do composto, já que os fluidos com uma menor proporção dessa substância e com adição de água obteve melhores resultados.

Cabe salientar também que a adição de nanopartículas de prata pode ter auxiliado no menor coeficiente de desgaste da amostra 2 em comparação com a 1. De acordo com Fissmer, Massi e Santos (2011), as nanopartículas de prata podem ser utilizadas como agente antimicrobiano e como lubrificante sólido, uma vez que elas adentram nos picos e vales microscópicos da superfície do metal, tornando a superfície menos rugosa (mais lisa) e, conseqüentemente, reduzindo o atrito.

Os fluidos que continham óleo de algodão tiveram um coeficiente de atrito maior no corpo-de-prova em relação as que utilizaram apenas óleo de mamona ou óleo de mamona e óleo essencial de melaleuca. Apesar desses achados, o óleo de algodão já foi investigado quanto a sua capacidade de promover a lubrificação em atividades de usinagem, conforme traz a pesquisa de Souza *et al.* (2022), na qual os autores afirmam que este óleo vegetal tem um bom desempenho ao ser aplicado no torneamento cilíndrico de uma peça de aço AISI 316, reduzindo a rugosidade média da superfície do material e a potência necessária para o corte.

Cabe salientar que todos os fluidos em que o óleo de algodão foi aplicado tinham um maior teor de propilenoglicol, o que pode ter influenciado negativamente na lubricidade da emulsão. Essa afirmação é corroborada ao analisar a amostra 6 (Fluido 10 Biocida), que, mesmo contendo óleo de mamona, alcançou um coeficiente de atrito maior do que as amostra 1 e 2, cujo os fluidos também eram compostos por óleo de mamona, mas com um teor menor de propilenoglicol e adição de água.

Apesar das diferentes taxas de desgaste, cabe salientar que todas os fluidos de corte foram capazes de reduzir consideravelmente o desgaste no corpo-de-prova, ao se comparar com o ensaio realizado a seco, em que, mesmo a amostra com pior resultado dentre as que utilizaram fluidos (amostra 3), o coeficiente de desgaste no ensaio realizado a seco foi, aproximadamente, 2000% superior. Em relação aos fluidos à base dos óleos vegetais de mamona, algodão e óleo essencial de melaleuca, quase todas as amostras, com exceção da amostra 3, teve resultado superior (menor k) do que o fluido comercial utilizado para efeito de comparação, demonstrando, portanto, a eficácia dos mesmos em reduzir o desgaste.

É preciso dizer que não existem normas para definir quais as taxas de desgaste aceitáveis para fluidos de corte, uma vez que eles possuem diferentes finalidades, podendo ter uma ou outra característica mais acentuada, de acordo com a necessidade do uso, entretanto, quando se exige uma capacidade lubrificante, este deve cumprir o seu papel, reduzindo efetivamente o atrito e, desta forma, o desgaste das ferramentas de corte, além de facilitar o processo de usinagem.

Por fim, é preciso salientar que a composição dos fluidos utilizados a base de óleo vegetal (amostra 1 a amostra 6) é menos tóxica e mais sustentáveis em comparação com outros fluidos comerciais que se utilizam de óleos fósseis. Os óleos vegetais de mamona e algodão e o óleo essencial de melaleuca não são tóxicos, sendo utilizados, inclusive, para a produção de cosméticos, na alimentação e possuem propriedades medicinais. Assim, os fluidos de corte a base desses compostos não causam mal ao homem. Ao considerar os óleos vegetais para uso como lubrificantes, é crucial levar em conta a composição dos ácidos graxos presentes em sua cadeia carbônica, especialmente as insaturações. Isso se deve à importância de manter a tensão superficial da película de óleo, garantindo que ela não seja rompida durante o contato entre as superfícies.

Em relação a questão ecológica, os óleos vegetais provem de fontes renováveis, as plantas, e, portanto, são ecologicamente sustentáveis, ao contrário dos óleos minerais, obtidos por meio da extração de combustíveis fósseis, não renováveis e que, por meio de diferentes mecanismos, poluem o meio ambiente. Também, ao serem descartados, os fluidos de corte a base de óleo vegetal acarretam em menor impacto ambiental, pois se degradam mais rápido dos que os à base de óleo mineral.

Assim, a partir dessas considerações e nos resultados obtidos nos cálculos, é possível dizer que os óleos vegetais de algodão, mamona e óleo essencial de melaleuca são alternativas viáveis em substituição aos óleos minerais na composição de fluidos de corte para fins de usinagem.

4.2 Análise de rugosidade das superfícies de desgaste das amostras

De maneira a compreender melhor o desgaste ocorrido nas amostras, torna-se necessário realizar um teste de rugosidade na superfície da pista de desgaste. A rugosidade refere-se às irregularidades ou asperezas presentes na superfície de um material, sendo uma medida da variação das alturas dos picos e vales. A rugosidade

é geralmente quantificada por meio de parâmetros como Ra (rugosidade média aritmética), Rz (altura máxima dos picos e vales) e Rq (rugosidade quadrática média). Esses parâmetros fornecem medidas numéricas da rugosidade da superfície, calculadas com base em medições de perfil topográfico.

Para realizar o teste de rugosidade nas amostras, utilizou-se um rugosímetro da marca Mitutoyo, pertencente ao laboratório C-LABMU da Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG). Primeiramente, procedeu-se à preparação adequada da superfície das amostras, realizando uma limpeza minuciosa para remover quaisquer resíduos que pudessem interferir na medição. A Figura 19 mostra o rugosímetro junto às amostras já preparadas para o teste.

Figura 19 – Rugosímetro e amostras preparadas para o teste



Fonte: Acervo pessoal (2022)

O próximo passo consistiu em definir os parâmetros de rugosidade que seriam testados. Para o presente estudo, foram selecionados três parâmetros: Ra, Rz e Rq. O parâmetro Ra mede a rugosidade média aritmética da superfície. O parâmetro Rq representa a rugosidade quadrática média em relação à linha média dentro do percurso de medição. Já o parâmetro Rz mede a soma da altura máxima dos picos e vales da superfície.

Com os parâmetros definidos, a etapa seguinte foi configurar o rugosímetro. Inicialmente, foi estabelecida a norma em que o teste seria realizado, utilizando a

norma padrão do aparelho, a ISO1997. Para os testes, foram necessárias a definição de 4 condições: comprimento de corte (λ_c e λ_s), número de comprimento da amostra (N) e velocidade de medição (V_m).

O comprimento de corte refere-se ao comprimento da superfície que é considerado para a análise da rugosidade. Em outras palavras, define a escala das características de rugosidade que serão levadas em consideração na medição. O número de comprimento da amostra corresponde à distância percorrida pela ponta de medição ao realizar a medição da rugosidade em uma superfície. Por fim, a velocidade de medição indica a taxa na qual a ponta de medição se move ao longo da superfície durante a realização da medição de rugosidade. Os valores dessas condições para os testes estão apresentados na Tabela 10 a seguir.

Tabela 10 – Condicionantes utilizados para a realização do teste de rugosidade nas amostras

λ_c	0,08 mm
λ_s	2,5 μ m
N	5
V_m	mm/s

Fonte: Aatoria própria (2022)

Com todas essas preparações concluídas, avançou-se para a realização dos testes. Cada uma das amostras foi submetida ao rugosímetro, posicionando a ponta de medição sobre a superfície de desgaste e iniciando o procedimento. Foram realizados três testes em cada amostra, visando obter um valor médio para cada parâmetro e eliminar a possibilidade de resultados inconsistentes. A Figura 20 ilustra o processo de teste com o rugosímetro.

Figura 20 – Teste de rugosidade das amostras



Fonte: Acervo pessoal (2022)

Os resultados obtidos por meio do teste de rugosidade são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Resultados obtidos no teste de rugosidade sob a superfície desgastada das amostras

	Teste 1			Teste 2			Teste 3		
	Ra (um)	Rq (um)	Rz (um)	Ra (um)	Rq (um)	Rz (um)	Ra (um)	Rq (um)	Rz (um)
Amostra 1	0,475	0,614	2,416	0,465	0,586	2,27	0,578	0,7	2,707
Amostra 2	0,577	0,704	2,618	0,427	0,546	2,134	0,354	0,44	1,624
Amostra 3	0,442	0,526	2,029	0,396	0,49	1,924	0,355	0,441	1,646
Amostra 4	0,331	0,406	1,575	0,357	0,454	1,906	0,285	0,352	1,514
Amostra 5	0,558	0,686	2,812	0,45	0,559	2,207	0,619	0,755	2,911
Amostra 6	0,648	0,779	2,956	0,652	0,804	3,089	0,422	0,539	2,278
Amostra 7	0,431	0,528	2,104	0,418	0,51	1,979	0,533	0,628	2,2
Amostra 8	0,687	0,869	3,138	1,06	1,311	4,954	0,626	0,793	2,861

Fonte: Autoria própria (2022)

Com os valores encontrados em cada teste, foi calculado a média e o desvio padrão, conforme é demonstrado na Tabela 12.

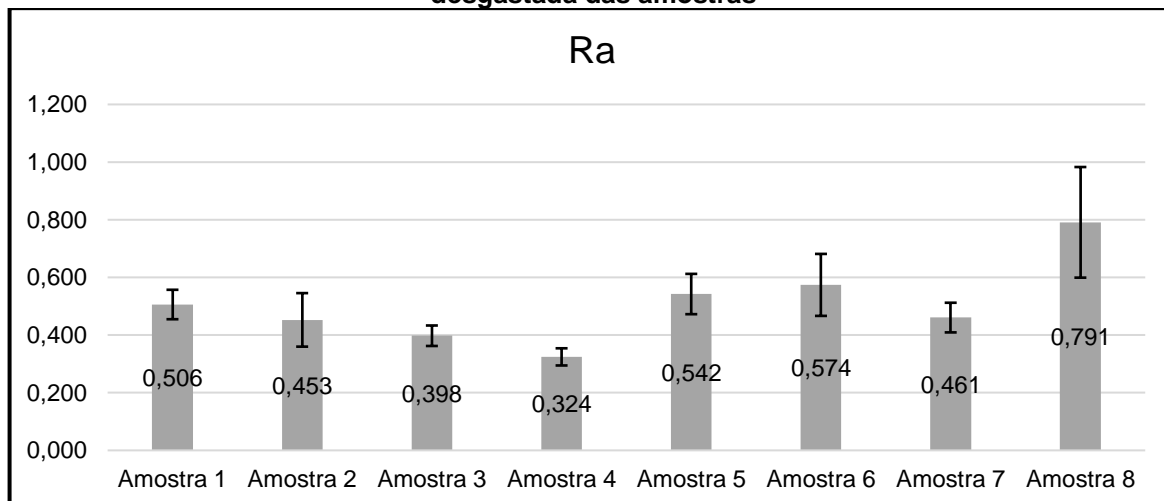
Tabela 12 – Média e desvio padrão dos valores obtidos no teste de rugosidade para cada amostra

	Média			Desvio padrão		
	Ra (um)	Rq (um)	Rz (um)	Ra (um)	Rq (um)	Rz (um)
Amostra 1	0,506	0,633	2,464	0,0510	0,0485	0,1816
Amostra 2	0,453	0,563	2,125	0,0928	0,1084	0,4058
Amostra 3	0,398	0,486	1,866	0,0355	0,0348	0,1615
Amostra 4	0,324	0,404	1,665	0,0297	0,0416	0,1722
Amostra 5	0,542	0,667	2,643	0,0698	0,0811	0,3111
Amostra 6	0,574	0,707	2,774	0,1074	0,1194	0,3551
Amostra 7	0,461	0,555	2,094	0,0514	0,0519	0,0904
Amostra 8	0,791	0,991	3,651	0,1918	0,2283	0,9282

Fonte: Autoria própria (2022)

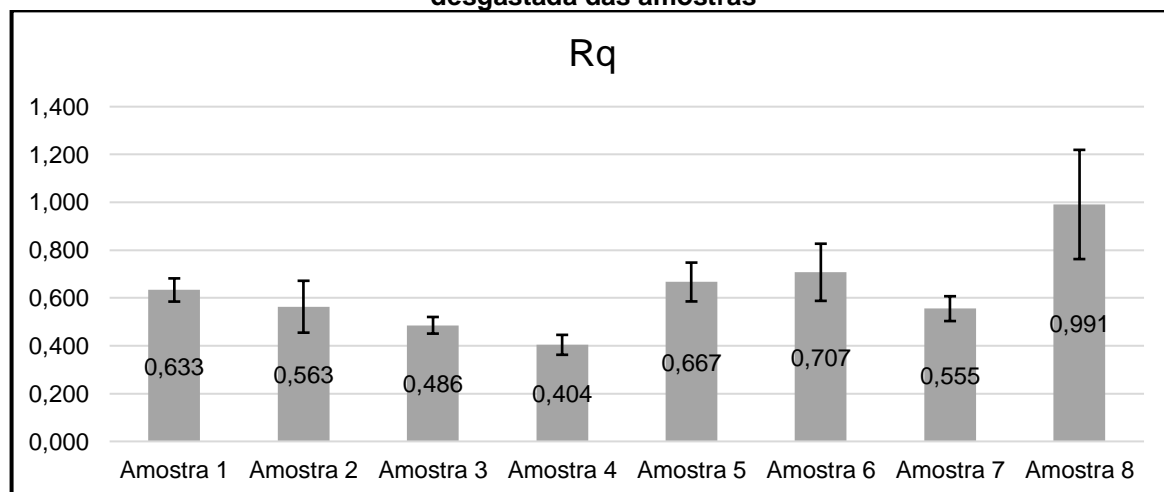
De modo a facilitar a análise dos resultados obtidos, apresenta-se a seguir os gráficos da média, com seu desvio padrão, para cada um dos parâmetros de rugosidade avaliados, Ra, Rq e Rz, e amostra.

Gráfico 3 - Parâmetro de rugosidade Ra (rugosidade média aritmética) na superfície desgastada das amostras



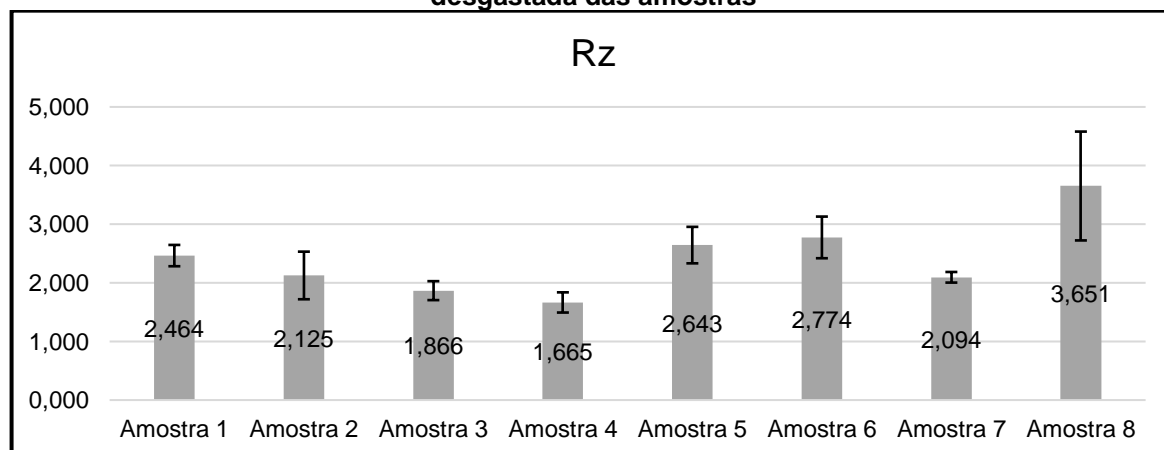
Fonte: Autoria própria (2022)

Gráfico 4 - Parâmetro de rugosidade Rq (rugosidade quadrática média) na superfície desgastada das amostras



Fonte: Autoria própria (2022)

Gráfico 5- Parâmetro de rugosidade Rz (altura máxima dos picos e vales) na superfície desgastada das amostras



Fonte: Autoria própria (2022)

Ao analisar os gráficos, o primeiro ponto que chama a atenção é que existe um padrão de rugosidade entre as amostras. Para todos os parâmetros, a amostra 4 apresentou os menores valores, enquanto a amostra 8 teve os maiores. Em uma escala crescente de rugosidade na superfície desgastada das amostras para os parâmetros Rq e Rz, temos: amostra 4, amostra 3, amostra 7, amostra 2, amostra 1, amostra 5, amostra 6 e amostra 8. No caso do parâmetro Ra, o padrão é semelhante, com exceção das amostras 2 e 7, que trocam de posição.

Outra análise relevante é a comparação entre os resultados do coeficiente de desgaste e a rugosidade das amostras. Ao comparar o gráfico do coeficiente de desgaste com os dos parâmetros de rugosidade avaliados, observa-se que, embora as amostras 1 e 2 apresentem o menor coeficiente de desgaste, a superfície desgastada é mais rugosa do que em outras amostras com maior perda de material. Ao calcular o coeficiente de desgaste das amostras, verificou-se que a amostra 4, que possui uma superfície desgastada menos rugosa dentre todas as amostras, sofreu uma perda de material maior do que as amostras 1 e 2. Por outro lado, a amostra 8, que passou pelo ensaio de desgaste a seco, apresentou os maiores valores nos parâmetros de rugosidade analisados, bem como o maior coeficiente de rugosidade.

Esse fato demonstra que, embora a rugosidade seja uma consequência direta do processo de desgaste, é possível ter superfícies mais rugosas mesmo em cenários de menor desgaste, da mesma forma que o desgaste também pode ser maior sem gerar uma grande rugosidade. Essa relação entre desgaste e rugosidade é um fenômeno complexo que depende de inúmeras variáveis, como o tipo de desgaste, a força e velocidade aplicadas, as características dos materiais em contato, entre outros.

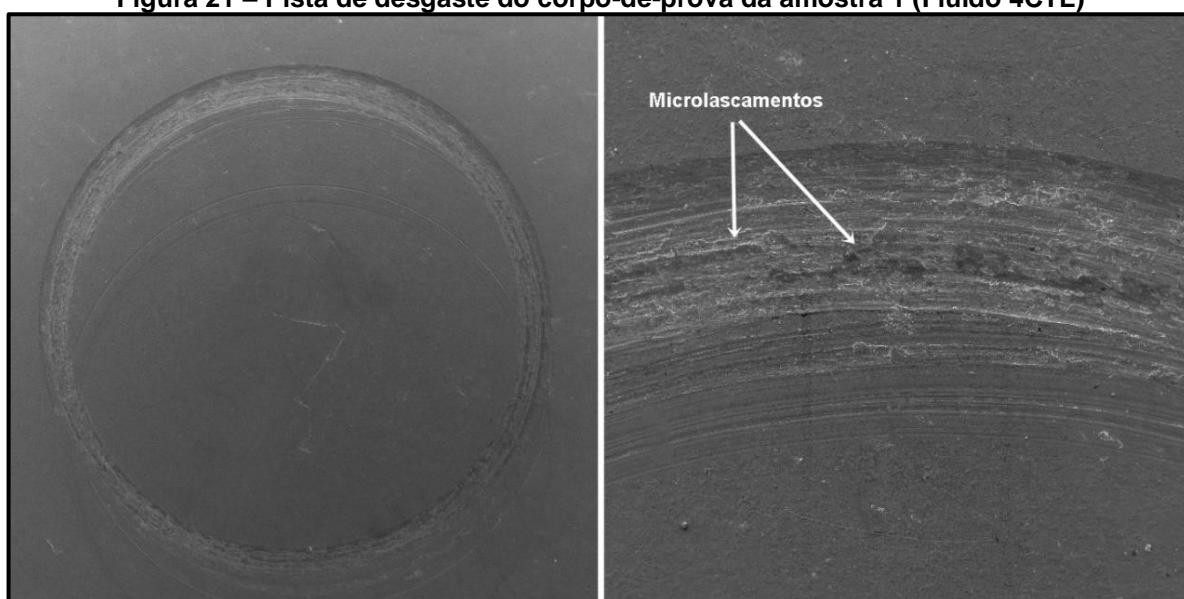
Apenas com os dados de desgaste e rugosidade, não é possível afirmar qual tipo de desgaste ocorreu de forma mais significativa em cada uma das amostras. A análise indica apenas que alguns dos fluidos de corte utilizados foram mais eficazes em reduzir o desgaste, embora tenham deixado uma superfície com maior rugosidade, enquanto outros não foram tão eficientes em reduzir o desgaste, embora tenham deixado uma superfície menos rugosa. Para compreender melhor os mecanismos de desgaste ocorridos nos ensaios, foi realizada a análise das amostras por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV), cujas imagens são apresentadas no tópico a seguir.

Compreender o mecanismo de desgaste é essencial para avaliar as formulações de fluidos de corte utilizados na usinagem de ligas de alumínio. Durante o fresamento dessas ligas, devido à alta condutividade térmica do material, o calor gerado durante o corte dissipa rapidamente na região de contato entre a ferramenta e o cavaco. Essa dissipação eficiente evita o superaquecimento e a aderência do material à ferramenta. Portanto, a utilização adequada de fluidos de corte, combinada com a seleção ideal dos parâmetros de usinagem, desempenha um papel crucial na formação eficiente do cavaco.

4.3 Análise do desgaste via MEV

De acordo com Dedavid, Gomes e Machado (2007), a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) é um tipo de microscopia utilizado em diferentes materiais, a qual utiliza um feixe de elétrons focalizados e que varre a superfície da amostra em análise, interagindo com a matéria, oferecendo diferentes informações sobre a morfologia e composição química do material. Essa interação entre elétrons e matéria é decodificada pelo equipamento e forma imagens de alta definição. Assim, as amostras foram submetidas ao MEV, cuja as imagens geradas são apresentadas a seguir.

Figura 21 – Pista de desgaste do corpo-de-prova da amostra 1 (Fluido 4CTL)

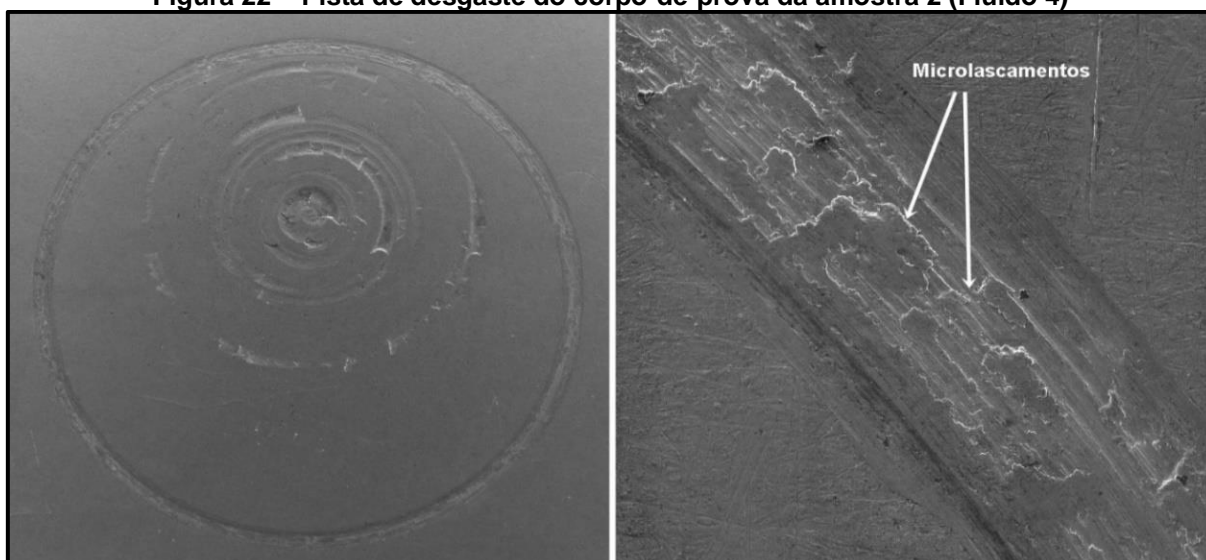


Fonte: Autoria própria (2022)

A figura 21 apresenta as imagens do corpo-de-prova (disco) da amostra 1 (Fluido 4CTL), obtidas pelo MEV, em que é possível verificar que o desgaste abrasivo

foi o principal mecanismo envolvido no ensaio, incluindo as evidências de microlascamentos, que são lascamentos menores do que utilizados para definir o fim da vida útil da ferramenta. Observa-se também que a pista de desgaste é relativamente uniforme, o que indica que o fluido de corte testado na amostra foi eficaz em formar um filme lubrificante entre as superfícies em contato, reduzindo o desgaste no corpo-de-prova.

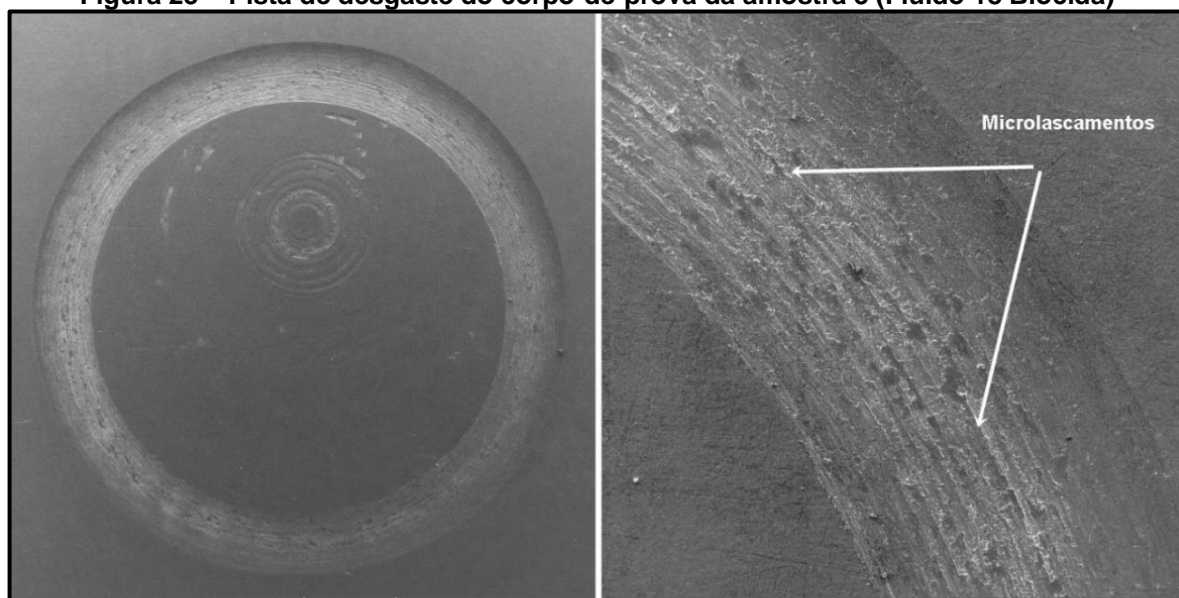
Figura 22 – Pista de desgaste do corpo-de-prova da amostra 2 (Fluido 4)



Fonte: Aatoria própria (2022)

A figura 22 apresenta a pista de desgaste no corpo-de-prova da amostra 2, que utilizou o Fluido 4, o qual obteve o menor coeficiente de desgaste entre as amostras ensaiadas. Assim como na primeira amostra, o desgaste abrasivo é evidente, com microlascamentos. Visualmente, a pista de desgaste possui uma largura menor do que a amostra 1, bem como aparenta ter menor profundidade, o que pode ser corroborado pelo fato de ter um menor coeficiente de desgaste.

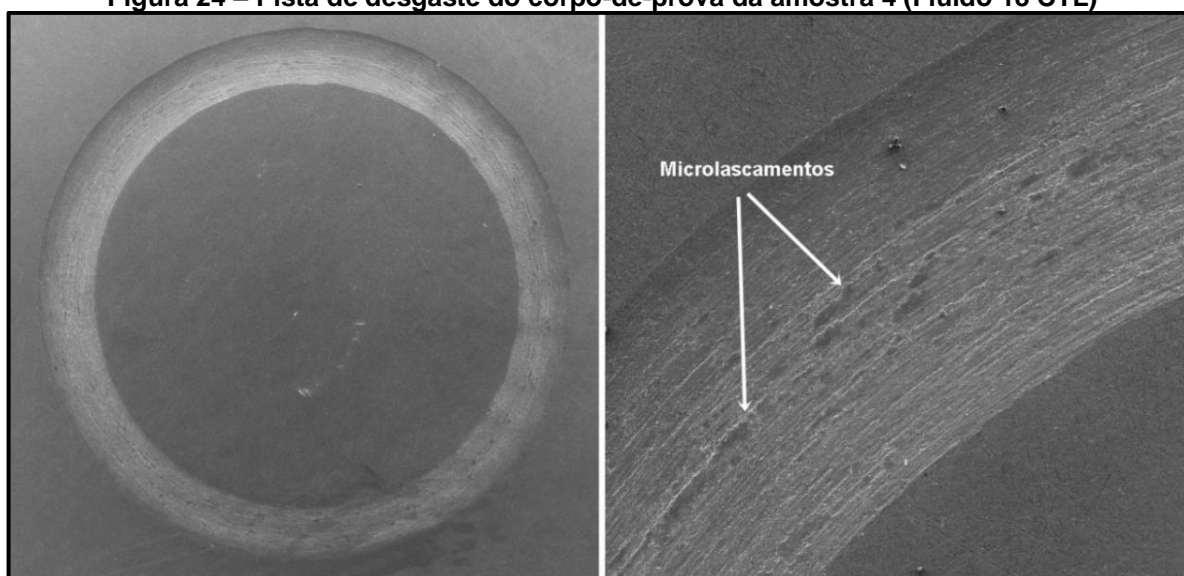
Figura 23 – Pista de desgaste do corpo-de-prova da amostra 3 (Fluido 18 Biocida)



Fonte: Autoria própria (2022)

A figura 23 apresenta a pista de desgaste da amostra 3, que utilizou o Fluido 18 Biocida) e apresentou o maior coeficiente de desgaste entre as amostras testadas com fluido. Visualmente, é possível perceber que a pista de desgaste é mais larga e profunda em comparação com as das amostras 1 e 2, indicando que houve maior desgaste. Assim como as demais, o principal mecanismo de desgaste foi o por abrasão, havendo evidências de microlascamentos. O desgaste também aparenta ter ocorrido de maneira uniforme em todo o trajeto, o que remete a uma ação positiva do fluido utilizado.

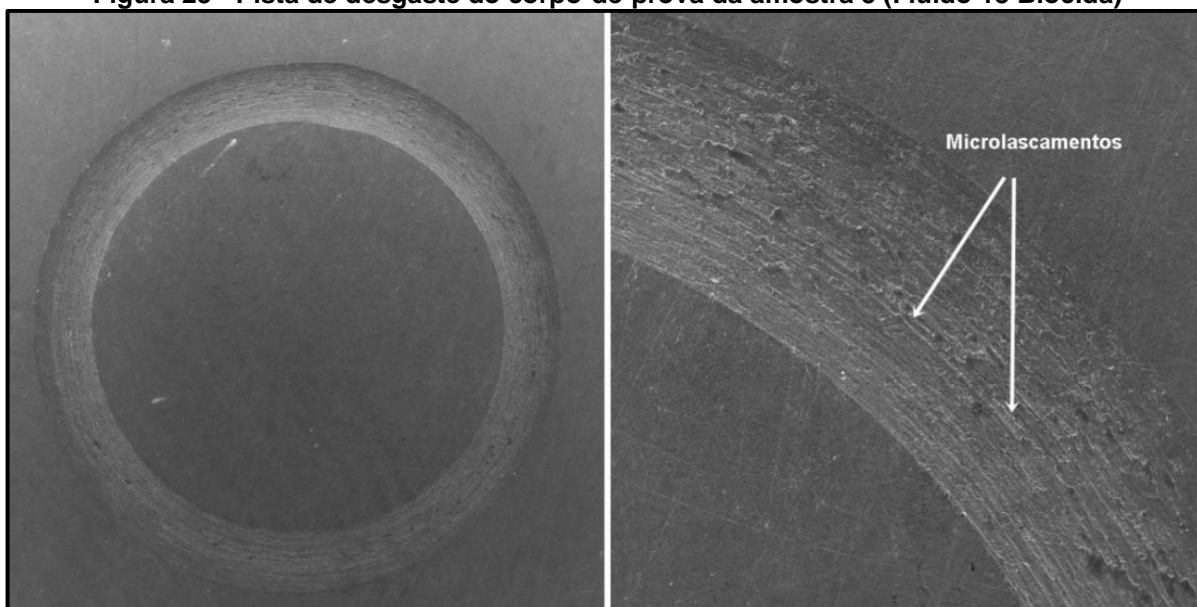
Figura 24 – Pista de desgaste do corpo-de-prova da amostra 4 (Fluido 18 CTL)



Fonte: Autoria própria (2022)

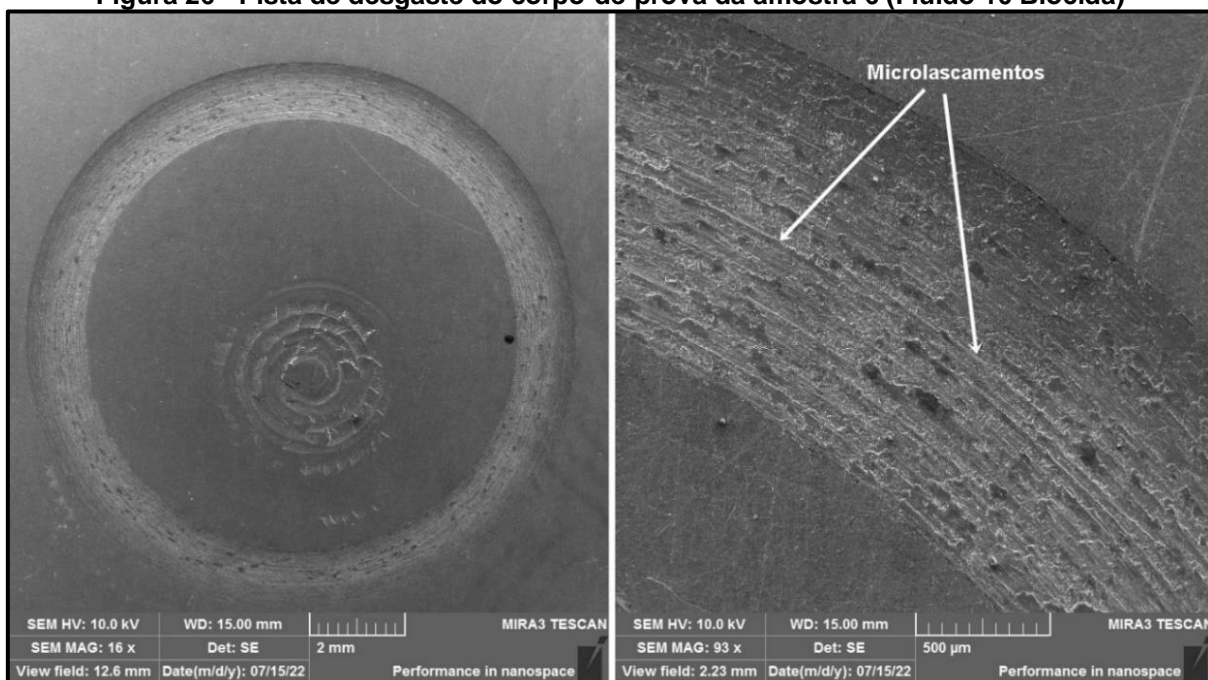
A Figura 24 traz a imagem da pista de desgaste da amostra 4, que utilizou o Fluido 18 CTL, obtendo o terceiro menor coeficiente de desgaste entre as amostras testada. Assim como a amostra 3, visualmente, a pista de desgaste é mais larga e profunda do que as amostras 1 e 2, sendo que o desgaste por abrasão, com microlascamentos, também ocorreu sobre a superfície do corpo-de-prova. Também demonstra uniformidade, indicando que a perda de material ocorreu de forma progressiva e constante, devido a ação lubrificante do fluido utilizado. Esses mesmos apontamentos servem para as demais amostras 5, 6 e 7, que obtiveram coeficientes de desgaste similares (0,6590 mm³/N.m, 0,7011 mm³/N.m e 0,7151 mm³/N.m, em sequência) que são apresentadas nas Figuras 25, 26 e 27, respectivamente.

Figura 25 - Pista de desgaste do corpo-de-prova da amostra 5 (Fluido 13 Biocida)



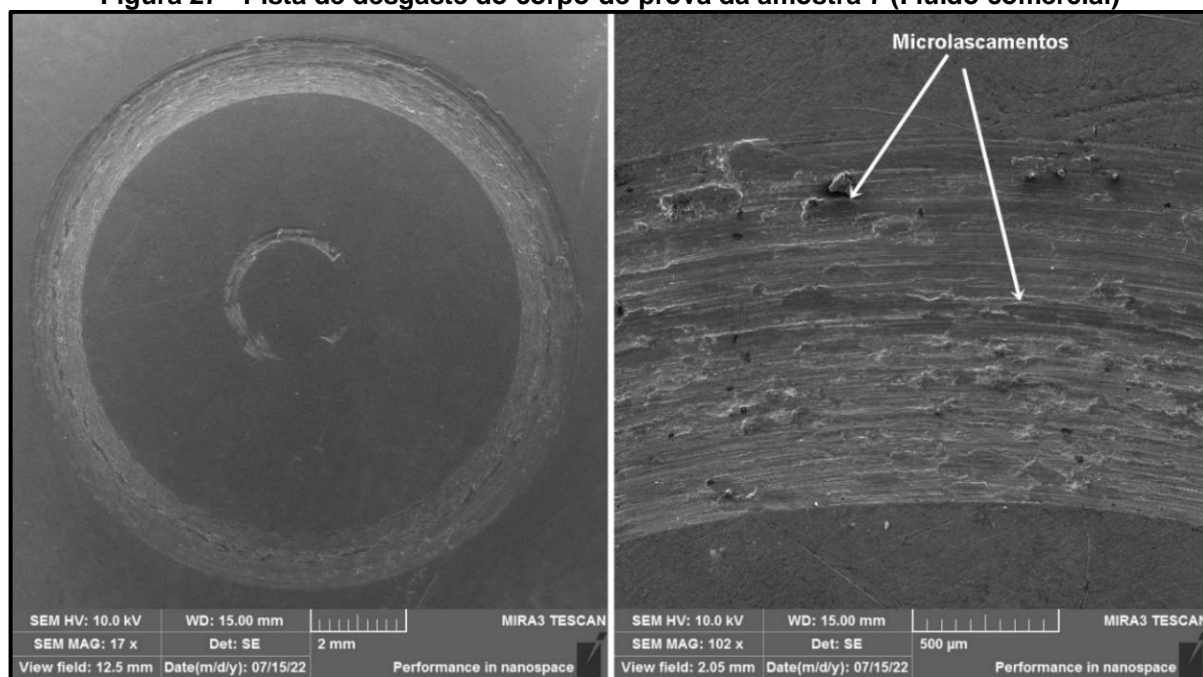
Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 26 - Pista de desgaste do corpo-de-prova da amostra 6 (Fluido 10 Biocida)



Fonte: Aatoria própria (2022)

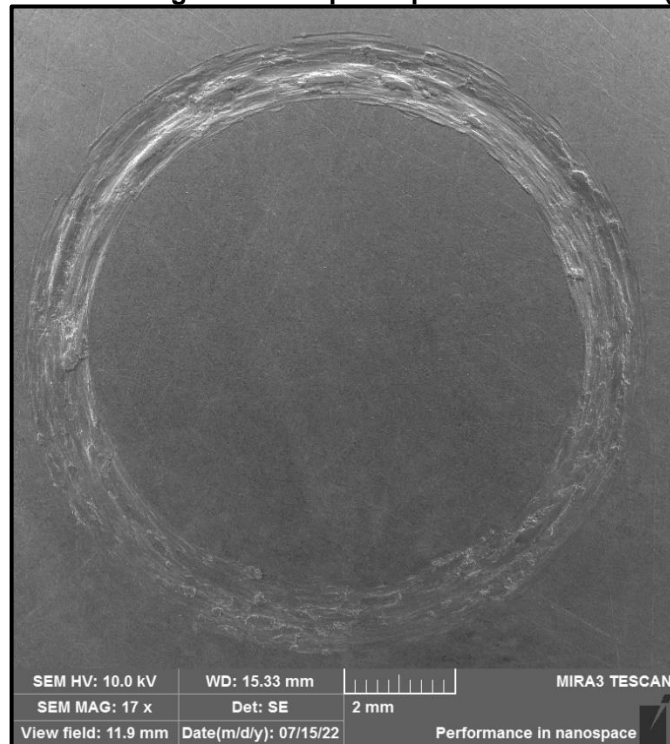
Figura 27 - Pista de desgaste do corpo-de-prova da amostra 7 (Fluido comercial)



Fonte: Aatoria própria (2022)

Por fim, a Figura 28 traz a imagem da pista de desgaste sob a superfície do corpo-de-prova após o ensaio na amostra 8, que foi realizado a seco.

Figura 28 - Pista de desgaste do corpo-de-prova da amostra 8 (sem fluido)



Fonte: Autoria própria (2022)

Como é possível ver na imagem, a superfície do corpo-de-prova da amostra 8, em que não foi utilizado fluido, apresentam uma pista de desgaste bastante irregular em relação as demais amostras, tanto em profundidade como nas suas bordas, o que está ligado diretamente com a falta de lubrificação. Ao analisar o formato da pista de desgaste padrões de desgaste, é possível dizer que houve tanto o desgaste abrasivo como por adesão, resultando nas irregularidades observadas na superfície do corpo de prova. A imagem corrobora também com alto coeficiente de desgaste identificado nesta amostra ($k = 15,2140 \text{ mm}^3/\text{N.m}$), ressaltando a importância do uso de lubrificantes para evitar um desgaste excessivo na ferramenta de corte, além dos efeitos no acabamento superficial da peça usinada.

5 CONCLUSÕES

Ao fim do presente estudo, é possível afirmar que o objetivo de analisar o comportamento tribológico de desgaste de uma peça de liga de Alumínio 6061, com o uso de diferentes emulsões a base de óleo vegetais de mamona, algodão e óleo essencial de melaleuca foi atingido, em que se verificou que tais compostos podem ser utilizados em fluidos de cortes e substituir os óleos minerais para conferir a capacidade lubrificante necessária em tais insumos.

Por meio dos dados obtidos nos ensaios feitos em tribômetro do tipo pino sobre disco, viu-se que houve perda de massa em todas as amostras testadas. O cálculo do coeficiente de desgaste revelou que a amostra 2, em que foi utilizado o Fluido 4, composto por 39% de propilenoglicol, 2% de óleo de melaleuca, 5% de óleo de mamona, 5% de nanopartícula de prata, 10% de tween 80 e 39% de água destilada, foi o que obteve o melhor resultado, com um coeficiente de desgaste de $0,0421 \text{ mm}^3/\text{N.m}$.

Já a amostra que teve o maior coeficiente de desgaste ($k = 0,7572 \text{ mm}^3/\text{N.m}$), dentre as que utilizaram um fluido para o ensaio, foi a 3 (Fluido 18 Biocida), composto por 46% de propilenoglicol, 5% de óleo de mamona, 10% de tween 80 e 39% de água destilada. Apesar desses resultados, todos os fluidos elaborados a base de óleo vegetal apresentaram um coeficiente de desgaste aceitável, ficando abaixo ou próximo, com exceção da amostra 3, do resultado obtido com a amostra 7, que utilizou um fluido comercial a base de óleo mineral.

Também, comparando os resultados obtido de todos os fluidos a base de óleo vegetal com o ensaio realizado a seco (amostra 8), pode-se observar que apresentaram uma boa lubricidade, já que o coeficiente de desgaste foi, aproximadamente, 2000% maior do que o pior resultado obtido com os fluidos testados.

A análise via Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) sob a superfície de desgaste dos corpos-de-prova, fabricados em Alumínio 6061, também ajudou a esclarecer como os fluidos agiram em cada um dos ensaios, com as amostras 1 (Fluido 4CTL) e 2 (Fluido 4) apresentando uma pista de desgaste, visualmente, de menor largura e profundidade, enquanto que as demais, com coeficiente de desgaste maiores, demonstraram uma maior largura e profundidade no desgaste, corroborando

com os dados encontrados por meio do cálculo do coeficiente de desgaste de cada amostra.

Apesar de tais variações, todas as amostras que utilizaram fluido tiveram um desgaste uniforme, o que está ligado diretamente com a capacidade de lubrificação desses compostos, algo que não ocorreu no ensaio realizado a seco, em que foi possível visualizar uma pista de desgaste bastante irregular, tanto em profundidade como em largura.

Dessa forma, é possível concluir que os óleos vegetais de mamona e algodão e o óleo essencial de melaleuca são opções viáveis para compor fluidos de corte para processos de usinagem, em substituição aos óleos minerais e aditivos de origem não renovável, apresentando as mesmas características desejáveis, além de serem mais sustentáveis. Cabe ressaltar que o ensaio tribológico realizado não mimetiza fielmente as diferentes condições das atividades de usinagem, que geralmente atuam em maior velocidade e carga aplicada em comparação com as utilizadas para os ensaios. Contudo, não se pode descartar os resultados obtidos nesta pesquisa, que demonstram que os óleos vegetais podem ser aplicados para fins de usinagem, sendo uma alternativa de alto potencial lubrificante aos de origem mineral, mais poluentes.

5.1 Recomendações para trabalhos futuros

Estudos futuros na área podem buscar mimetizar melhor as condições reais de usinagem, bem como incluir novas formas análise, como a da composição química e características físicas do fluido antes e após os processos, o que possibilitaria corroborar, ou não, ainda mais com a possibilidade de utilizar-se de óleos vegetais como base na composição de fluidos de corte, em processos reais de usinagem.

REFERÊNCIAS

ADHVARYU, A.; ERHAN, S. Z.; PEREZ, J. M. Tribological studies of thermally and chemically modified vegetable oils for use as environmentally friendly lubricants. **Wear**, v. 257, n. 3-4, p. 359-367, 2004.

AGWU, U. J.; BESSANT, J. Sustainable Business Models: A Systematic Review of Approaches and Challenges in Manufacturing. **Journal of Contemporary Administration**, v. 25, 2021.

ALMEIDA, M. P. *et al.* Explorando a química e a atividade antifúngica de óleos essenciais: Uma proposta de projeto para a Educação Básica. **Latin American Journal of Science Education**, v. 2, p. 22059, 2015.

Alumínio 6061-T6. Sítio eletrônico Indusmart, 2023. Acesso em: <https://www.indusmart.com.br/materiais/aluminio-6061-t6/>. Acesso em: 03 nov. 2022.

ASTM. American Society for Testing and Materials. **ASTM G99-17**: Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus. ASM Society: United States, 5 p., 2017. Disponível em: <https://www.astm.org/g0099-17.html>. Acesso em: 03 nov. 2022.

BAESSO, M. *et al.* Inibidores de corrosão em metais: uma revisão bibliográfica. **Anais do Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão**, v. 13, n. 3, 2021.

BAYER, R. **Mechanical Wear Fundamentals and Testing**. 2ª ed. amp. e rev. Boca Raton: CRC Press, 2004.

BORGES, F. S. S. *et al.* Síntese de biolubrificante do óleo de algodão por catálise heterogênea a base de silicatos. **Open science research IV**, v. 4, n. 1, p. 620-631, 2022.

BOURITHIS, L.; PAPADIMITRIOU, G. D.; SIDERIS, J. Comparison of wear properties of tool steels AISI D2 and O1 with the same hardness. **Tribology International**, v. 39, n. 6, p. 479-489, 2006.

BRESSAN, José Divo; GILAPA, Leonidas M.; DAROS, Deivid Paganini. Influência do revenimento na resistência ao desgaste do aço villares d2. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, v. 4, n. 1, p. 53-58, 2013.

CALLEGARO, C. C.; CÉSAR, F. I. G. Manuseio de fluidos de cortes. **REGRASP - Revista para Graduandos/IFSP - Campus São Paulo**, v. 4, n. 1, p. 76-98, 2019.

CAMPOS, E. S. C.; SANTOS, V. M. L. Estudo do processo de extração de óleo de mamona em cooperativas do polo São Francisco. **Engevista**, v. 17, n. 4, p. 477-490, 2015.

CASTRO, R. M. *et al.* Avaliação tribológica de óleos hidráulicos biodegradável e mineral com deslizamento entre as ligas de Cu-Zn e WC-CoCr. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 24, 2019.

CAVALARI, T. G. F.; OLIVEIRA, A. C. Óleo essencial de melaleuca. **Revista Saúde em Foco**, n. 9, 2017.

COÊLHO, J. D. **Algodão: produção e mercados**. Fortaleza: Banco do Nordeste do Brasil, ano 6, n.166 2021.

COSTA, R. C. *et al.* Avaliação da resistência a corrosão de revestimentos metálicos depositados por aspersão térmica a arco: uma aplicação em trocadores de calor. **Soldagem & Inspeção**, v. 19, p. 292-301, 2014.

DACAS, F. P.; COSTA, R. Avaliação da Refrigeração de Corte Criogênica na Usinagem CNC do Aço Inoxidável Martensítico AISI 420. **Caderno de Propriedade Intelectual e Transferência de Tecnologia**, v. 2, n. 1, p. 35-47, 2020.

DANTAS, M. **Tamanho do algodoeiro afeta a produção e a qualidade das fibras**. Sítio eletrônico Dia Rural, 2022. Disponível em: <https://diarural.com.br/tamanho-do-algodoeiro-afeta-a-producao-e-a-qualidade-das-fibras/>. Acesso em: 02 nov. 2022.

DANTAS, T. E. T. *et al.* How the combination of Circular Economy and Industry 4.0 can contribute towards achieving the Sustainable Development Goals. **Sustainable Production and Consumption**, v. 26, p. 213-227, 2021.

DEDAVID, B. A.; GOMES, C. I.; MACHADO, G. **Microscopia eletrônica de varredura: aplicações e preparação de amostras**: materiais poliméricos, metálicos e semicondutores. Porto Alegre: EdiPUCRS, 2007.

DIEHL, I. L.; DONG, J.; ROCHA, A. S. Propriedades do aço AISI 4140 nitretado a gás. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 22, 2017.

DUFLOU, J. R. *et al.* Towards energy and resource efficient manufacturing: A processes and systems approach. **CIRP annals**, v. 61, n. 2, p. 587-609, 2012.

FARIA, F. C. **Tribologia**. Caxias do Sul: ICM, 2017.

FARIAS, H. H. *et al.* Epoxidação metálica do óleo de mamona para síntese de biolubrificante. **Educação, Ciência e Saúde**, v. 8, n. 2, 2021.

FERNANDES, V. Desgaste e os seus mecanismos. **Revista online Engenheiro de materiais**, 2017.

FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. 18ª reimpressão. São Paulo: Editora Blucher, 2018.

FERREIRA, P. G. *et al.* Aqui tem química: supermercado Parte I. Óleos e gorduras. **Revista Virtual de Química**, v. 14, p. 185-199, 2022.

Fluido de corte integral inativo para usinagem de média e baixa velocidade. Solutio, 2023. Disponível em: <https://solutio.ind.br/site/produto/sol-cort-1145-i-fluido-de-corte-integral-inativo-para-usinagem-de-media-e-baixa-velocidade/>. Acesso em: 12 dez. 2022.

Fluidos de corte. Chemlub, 2017. Disponível em: <https://www.chemlub.com.br/pt-br/lubrificantes-para/fluidos-de-corte>. Acesso em: 12 dez. 2022.

HIGUERA-COBOS, O. F.; FLOREZ-GARCIA, L. C.; PEDRAZA-YEPES, C. A. Finite elements analysis of the deformation applied to the 6061-T6 aluminum alloy by equal channel angular pressing. **Revista Facultad de Ingenieria**, v. 28, n. 50, 2019.

JACOBINA, M. C. M.; FRAGA, I. M.; NETO, F. V. C. Influência da incorporação do óleo de algodão na estabilidade à oxidação do biodiesel produzido a partir de blendas de algodão e soja. **Acta Tecnológica**, v. 11, n. 1, p. 21-31, 2016.

JORGE, N. Química e tecnologia de óleos vegetais. **São Paulo: Cultura Acadêmica**, v. 1, p. 165, 2009.

KAWAZOWE, L. A. O óleo vegetal. **Food ingredients Brasil**, n.º 31, 2014.
LACERDA, W. F.; COZZA, R. C. Análise do efeito do tratamento térmico do aço p410d sobre o desgaste abrasivo. *In: X Simpósio de Iniciação Científica, Didática e de Ações Sociais da FEI*, 2020.

LISBOA, F. C.; MORAES, J. J. B.; HIRASHITA, M. A. Fluidos de corte: uma abordagem geral e novas tendências. **Encontro Nacional de Engenharia de Produção**, v. 33, p. 2-16, 2013.

MACHADO, A. R. *et al.* **Teoria da usinagem dos materiais**. Rio de Janeiro: Editora Blucher, 2015.

MAIA, D. A. S. *et al.* Fluidos de corte: novas formulações e recuperabilidade. *In: 4º PDPETRO*, 2007.

MALDANER, F. H. *et al.* Pesquisa de anterioridade de equipamentos para ensaios tribológicos através de análise de dados de patentes. *In: Proceedings of the 11th Brazilian Congress on Manufacturing Engineering-COBEF*, 2021.

MARQUES, F. M. *et al.* Análise de desgaste abrasivo do revestimento duro a base de carbonetos de cromo depositado por SMAW. **Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica**, v. 20, n. 2, p. 13, 2016.

MARQUES, F. M. *et al.* Caracterização de desgaste de brocas de HSS revestidas com ALCRN e não revestidas, em ensaios de furação, na usinagem de ferro fundido nodular DIN GGG 50. **Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica**, v. 19, n. 1, 2015.

MARTINS, J. P. P. **Projeto de um Tribometro do Tipo Pino-Disco**. 2017. 274 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Cidade do Porto - Pt, 2017. Disponível em: file:///C:/Users/Poliedro01/Downloads/DM_JoaoMartins_2017_MEM-1.pdf. Acesso em: 06 out. 2022.

MILCHESKI, J. L. *et al.* Tribologia voltada para a indústria automotiva. **Revista Tecnológica da UniFatec-PR**, v. 12, n. 1, 2021.

MOURA, C. W. *et al.* Desenvolvimento de material abrasivo para aplicação em ensaios de desgaste abrasivo a três corpos. *In: 27ª Mostra Específica de Trabalhos e Aplicações*, 2017.

NAZZARO, F. *et al.* Essential oils and antifungal activity. **Pharmaceuticals**, v. 10, n. 4, p. 86, 2017.

NEPOMOCENO, T. A. R.; PIETROBON, A. J. *Melaleuca alternifolia*: uma revisão sistemática da literatura brasileira. **Uningá Review**, v. 35, p. eRUR3409-eRUR3409, 2020.

NFPA®. **National Fire Protection Association 704**: Standard System for the Identification of the Hazards of Materials for Emergency Response. National Fire Protection Association, 2017

OLIVEIRA, J. F. G.; ALVES, S. M. Adequação ambiental dos processos usinagem utilizando produção mais limpa como estratégia de gestão ambiental. **Produção**, São Paulo, v. 17, n. 1, p. 129-138, 2007.

OLIVEIRA, M. I. *et al.* Extração e caracterização do óleo essencial de melaleuca e desenvolvimento de uma formulação semi-sólida de uso tópico. **Revista Jovens Pesquisadores, Santa Cruz do Sul**, v. 5, n. 1, p. 123-134, 2015.

PORTNEY, K. E. **Sustainability**. MIT Press, 2015.

RAMOS, D. T. L. *et al.* Projeto de um banco de ensaio de desgaste do tipo " *pin-on-disc*". **Cerâmica**, v. 60, p. 443-448, 2014.

REIS, J. B. *et al.* Avaliação da atividade antimicrobiana dos óleos essenciais contra patógenos alimentares. **Brazilian Journal of Health Review**, v. 3, n. 1, p. 342-363, 2020.

RESENDE, R. R. **Biotecnologia aplicada à agroindústria**: fundamentos e aplicações - volume 4. São Paulo: Blucher, 2016

REYNOL, F. USP São Carlos desenvolve o primeiro óleo vegetal de corte. **Conhecimento & Inovação**, v. 5, n. 3, p. 30-31, 2009.

RIBEIRO FILHO, P. R. B. *et al.* Propriedades físicas de óleos lubrificantes minerais e vegetais e avaliação de desgastes por four ball. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 5, n. 1, 2016.

RIBEIRO, C. Plantio de mamona e suas características. Blog Sensix, 2022. Disponível em: <https://blog.sensix.ag/plantio-de-mamona-no-brasil-e-suas-caracteristicas/>. Acesso em: 07 nov. 2022.

SÁ, N. A. **Fluidos de Corte**. Escola Politécnica de Pernambuco, 2010, 16p.

SANKARANARAYANAN, R. *et al.* A comprehensive review on research developments of vegetable-oil based cutting fluids for sustainable machining challenges. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 67, p. 286-313, 2021.

SANTOS, W. C. *et al.* Desenvolvimento de dispositivo e estudo do comportamento ao microdesgaste abrasivo do aço AISI 420 temperado e revenido. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 20, p. 304-315, 2015.

SILVA, E. F. M. *et al.* Análise de viabilidade da utilização do óleo de dendê na lubrificação automotiva através do ensaio pin-on-disk. **ForScience**, v. 7, n. 2, 2019.

SILVA, L. L. *et al.* Atividades terapêuticas do óleo essencial de melaleuca (*melaleuca alternifolia*) Uma revisão de literatura. **Brazilian Journal of health review**, v. 2, n. 6, p. 6011-6021, 2019.

SILVA, S. M.; MAIA, L. F. O; DAMASCENO, S. M. Estudo da extração de óleo do caroço de algodão por solvente alternativo. **Blucher Chemical Engineering Proceedings**, v. 1, n. 2, p. 3583-3590, 2015.

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: 10 dez. 2022.

SOARES, Rogério Manhães. **Avaliação Técnica, Mercadológica e de Tendências da Utilização Óleos Lubrificantes de Base Begetal**. 2013. 131 f. Tese (Doutorado) - Curso de Tecnologia de Processos Químicos, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - Rj, 2013. Disponível em: http://epqb.eq.ufrj.br/wp-content/uploads/2021/04/13_49.pdf. Acesso em: 06 out. 2022.

SOUSA JUNIOR, 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.

SOUZA, H. C. P. *et al.* Análise dos efeitos do uso de óleos vegetais aplicados na forma MQF na usabilidade do aço AISI 316 Analysis of the effects of using vegetable oils applied in MQF form on the usability of AISI 316 steel. **Brazilian Journal of Development**, v. 8, n. 5, p. 36691-36712, 2022.

SOUZA, J. F. Comportamento tribológico do óleo de moringa em ensaios de atrito por deslizamento. **Revista Tecnológica**, p. 295-304, 2015.

SOUZA, L. C. *et al.* Prospecção Tecnológica da utilização dos Ácidos Graxos de óleos vegetais na indústria de cosméticos. **Cadernos de Prospecção**, v. 15, n. 2, p. 541-556, 2022.

SOUZA, M. C. D *et al.* **Estudo da Viabilidade de Reutilização de Fluido Lubrificante em Processos das Industrias Metalmecânicas.** VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica – CONEM. São Luís – Maranhão, p. 8.2012

STOETERAU, R. L. Fundamentos dos Processos de Usinagem. **São Paulo: USP,** 2003.

SUMARA, G. S. *et al.* Avaliação da resistência ao desgaste de revestimentos soldados para aplicação em britador de carvão mineral. **Revista Vincci-Periódico Científico do UniSATC,** p. 27-54, 2021.

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

TREVIZANI, A. C. *et al.* Avaliação dos métodos de extração aplicados ao bagaço de laranja. **Revista Virtual de Química,** v. 11, n. 3, 2019.

TREZONA, R. I.; ALLSOPP, D. N.; HUTCHINGS, I. M. Transitions between two-body and three-body abrasive wear: influence of test conditions in the microscale abrasive wear test. **Wear,** v. 225, p. 205-214, 1999.

VERDI, J. **Dispositivo Pino-Disco para Análise de Desgaste na Presença de Diesel e Biodiesel.** 2011. 95 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia e Tecnologia de Materiais, Programa de Pós- Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre - Rs, 2011. Disponível em: <https://tede2.pucrs.br/tede2/bitstream/tede/3191/1/436188.pdf>. Acesso em: 06 out. 2022.

VIANA, E. P.; VASCONCELOS, M. G.; VASCONCELOS, R. G. Análise do comportamento da resina composta frente aos diferentes mecanismos de desgaste: uma revisão de literatura. **SALUSVITA,** v. 40, n. 1, p. 158-178, 2021.

VIEIRA, V. A. *et al.* Avaliação do rendimento dos óleos essenciais em espécies de *Piper*. **Anais da Mostra Nacional de Iniciação Científica e Tecnológica Interdisciplinar (MICTI)-e-ISSN 2316-7165,** v. 1, n. 13, 2020.

WANG, L.; XU, X. W.; YANG, Q. Sustainability assessment for turning process based on life cycle assessment. **International Journal of Sustainable Manufacturing,** v. 1, n. 2, p.211-225, 2009.