



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

JOSEAN DA SILVA LIMA JUNIOR

**ANÁLISE TÉCNICO-ECONÔMICA DE FLUIDOS DE CORTE A BASE DE ÓLEO
VEGETAL E SINTÉTICO EM OPERAÇÕES DE USINAGEM DO AÇO SAE 1045**

Recife

2021

JOSEAN DA SILVA LIMA JUNIOR

**ANÁLISE TÉCNICO-ECONÔMICA DE FLUIDOS DE CORTE A BASE DE ÓLEO
VEGETAL E SINTÉTICO EM OPERAÇÕES DE USINAGEM DO AÇO SAE 1045**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Engenharia de Materiais e Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Flávio José da Silva.

Coorientador: Prof. Dr. Maxime Montoya.

Recife

2021

Catálogo na fonte:
Bibliotecária Sandra Maria Neri Santiago, CRB-4 / 1267

L732a

Lima Junior, Josean da Silva.

Análise técnico-econômica de fluidos de corte a base de óleo vegetal e sintético em operações de usinagem do aço SAE 1045 / Josean da Silva Lima Junior. – 2021.

100 f.: il., figs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Flávio José da Silva.

Coorientador: Prof. Dr. Maxime Montoya.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Recife, 2021.

Inclui referências e apêndices.

1. Engenharia mecânica. 2. Fluido biodegradável. 3. Torneamento. 4. Corrosão. 5. Atrito. 6. Usinabilidade. 7. Análise financeira. I. Silva, Flávio José da (Orientador). II. Montoya, Maxime (Coorientador). III. Título.

UFPE

621 CDD (22. ed.)

BCTG/2022-32

JOSEAN DA SILVA LIMA JUNIOR

**ANÁLISE TÉCNICO-ECONÔMICA DE FLUIDOS DE CORTE A BASE DE ÓLEO
VEGETAL E SINTÉTICO EM OPERAÇÕES DE USINAGEM DO AÇO SAE 1045**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica. Área de concentração: Engenharia de Materiais e Fabricação.

Aprovada em: 23/06/2021.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Flávio José da Silva (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Oscar Olímpio de Araújo Filho (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Anderson Clayton Alves de Melo (Examinador Externo)
Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Dedico eternamente este trabalho a Deus, por guiar-me diariamente, e a minha família e minha noiva, pelo apoio e amor incondicional de todos os dias.

AGRADECIMENTOS

Agradeço acima de tudo a Deus, a base de tudo que existe, por me guiar pelo caminho correto em todos os momentos.

À minha noiva, Maria do Livramento, por toda paciência, carinho e amor. Obrigado por sempre acreditar em mim. Te amo muito.

Aos meus pais, pelo incentivo, educação e amor incondicional. Obrigado por serem os professores que construíram a pessoa que sou hoje. Amo vocês.

Ao meu irmão Gilson, por compartilhar sempre bons momentos comigo.

Aos meus avós pelo apoio desde os primeiros momentos de minha existência.

Aos meus grandes amigos Augusto Rodrigues, Lucas Oliveira e Alandson Lacerda, por sempre estarem comigo e por fazer parte de um dos melhores momentos da minha vida. Vocês são irmãos que a vida me presenteou.

Agradeço à UFPE pela oportunidade de ingresso na área acadêmica, e aos funcionários e professores do PPGEM, os quais sempre se demonstraram solícitos e gentis.

Um agradecimento em especial ao meu orientador, o Prof. Dr. Flávio José da Silva, pelo seu profissionalismo, dedicação, gentileza e paciência, durante as disciplinas ministradas e nas orientações.

De maneira similar, agradeço ao meu coorientador Prof. Dr. Maxime Montoya por sua disponibilidade no ensinamento teórico e prático de usinagem, bem como nas orientações.

Especialmente, agradeço aos Professores Dr. Oscar Olímpio de Araújo Filho e Kleber Gonçalves Bezerra Alves por todos os ensinamentos durante as disciplinas ministradas e contribuições para o desenvolvimento deste trabalho. Muito obrigado.

Gostaria de agradecer ao Prof. Dr. Anderson Clayton Alves de Melo por aceitar compor a banca examinadora de minha dissertação e por todas as contribuições referentes ao trabalho.

Muito obrigado aos meus companheiros de classe e de atividades laboratoriais, em especial a Willicleyton Oliveira, Eptácio Bronzeado, Ivan Picchi, Yuri Lira, Kaciê Trindade, Moisés Euclides e Igor Jordão.

Agradeço ao COMPOLAB pela realização dos ensaios tribológicos e eletroquímicos, em especial a Rafael Gleymir e Walter Leandro.

Grato também aos técnicos Rubens Andrade e Janaina Cirino, por toda a disponibilidade e ajuda durante meus experimentos.

Gostaria de agradecer também à Profa. Dra. Magda Rosangela Santos Vieira por todos os ensinamentos e dicas para o desenvolvimento dos ensaios eletroquímicos.

Finalmente, agradeço ao CNPq pelo apoio financeiro, por meio da bolsa concedida para a realização do Mestrado.

RESUMO

A utilização de fluidos a base de óleo mineral nos processos de usinagem resulta em diversos problemas, desde doenças ocupacionais até impactos ambientais. Neste cenário, os fluidos sintéticos são uma alternativa eficaz para a redução desses problemas, mesmo apresentando um elevado custo. Visando contribuir com a fabricação sustentável é crescente o número de estudos relacionados à utilização de fluidos de corte vegetais, contribuindo com a redução desse impacto à humanidade. Contudo, um grande desafio é obter um fluido biodegradável com um bom desempenho da vida da ferramenta de corte, acabamento superficial desejado e de baixo custo. Sendo assim, o objetivo deste trabalho foi realizar uma análise técnico-econômica entre emulsões a base de óleo de babaçu, de mamona e de um fluido comercial sintético na operação de torneamento cilíndrico do aço SAE 1045. Do ponto de vista técnico foram realizados ensaios na configuração pino-disco, para levantar as propriedades tribológicas, e eletroquímicas, com intuito de avaliar a corrosividade de cada fluido, bem como foi levantada a influência das formulações estudadas na vida da ferramenta em diferentes velocidades de corte (90, 70 e 50 m/min) e na rugosidade superficial da peça final no processo de torneamento. Com relação à análise econômica, foi estruturada uma avaliação comparativa de custo por volume de produção com base nas informações geradas nos ensaios de usinagem. Os resultados desta pesquisa mostraram que o fluido a base de óleo de babaçu proporcionou a obtenção de um menor coeficiente de atrito (μ_c). No estudo da corrosividade, a melhor opção notada por meio dos ensaios eletroquímicos foi a emulsão a base de óleo sintético, evidenciando ser menos agressiva à superfície da peça. Além disto, ao realizar os ensaios de vida de ferramenta percebeu-se que ao diminuir a velocidade de corte se propiciava uma operação com maior adequação às propriedades dos fluidos biodegradáveis, sendo o melhor resultado apresentado pela emulsão a base de óleo de mamona, chegando a uma vida útil de 66,62 minutos. Em relação à rugosidade da superfície usinada em cada processo, identificou-se que o fluido sintético proporcionou a obtenção dos melhores resultados. Por fim, na avaliação econômica, as opções com maior potencial foram o fluido sintético na velocidade de 90 m/min e a emulsão a base de óleo de mamona nas velocidades de 70 e 90 m/min.

Palavras-chave: fluido biodegradável; torneamento; corrosão; atrito; usinabilidade; análise financeira.

ABSTRACT

The use of mineral oil-based fluids in machining processes results in several problems, from occupational diseases to environmental impacts. In this scenario, synthetic fluids are an effective alternative to reduce these problems, even with a high cost. Aiming to contribute to sustainable manufacturing, there is a growing number of studies related to the use of vegetable cutting fluids, helping to reduce this impact on humanity. However, a major challenge is to obtain a biodegradable fluid with good cutting tool life performance, desired surface finish and low cost. Therefore, the objective of this work was to carry out a technical-economic analysis between emulsions based on babassu oil, castor oil and a synthetic commercial fluid in the cylindrical turning operation of SAE 1045 steel. From a technical point of view, tests were carried out in the pin-disk configuration, to survey the tribological and electrochemical properties, in order to assess the corrosivity of each fluid, as well as the influence of the studied formulations on the tool life at different cutting speeds (90, 70 and 50 m/ min) and the surface roughness of the final part in the turning process. Regarding the economic analysis, a comparative evaluation of cost per production volume was structured based on the information generated in the machining tests. The results of this research showed that the babassu oil-based fluid provided a lower coefficient of friction (μ_e). In the study of corrosivity, the best option noticed by means of electrochemical tests was the emulsion based on synthetic oil, showing that it is less aggressive to the surface of the part. In addition, when performing the tool life tests, it was noticed that decreasing the cutting speed provided an operation with greater adequacy to the properties of biodegradable fluids, with the best result presented by the castor oil-based emulsion, reaching a lifetime of 66.62 minutes. Regarding the roughness of the machined surface in each process, it was identified that the synthetic fluid provided the best results. Finally, in the economic evaluation, the options with the greatest potential were the synthetic fluid at the speed of 90 m/min and the castor oil-based emulsion at the speeds of 70 and 90 m/min.

Keywords: biodegradable fluid; turning; corrosion; friction; machinability; financial analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Os pilares da fabricação sustentável	19
Figura 2 – Técnicas de fabricação sustentável em usinagem	20
Figura 3 - Tipos básicos de fluido de corte	23
Figura 4 - Classificação esquemática dos fluidos de corte	23
Figura 5 – Principais tipos de fluidos de corte integrais.....	24
Figura 6 – Produção de óleos vegetais no território brasileiro	28
Figura 7 – Curva de vida de ferramenta	30
Figura 8 – Ensaio na configuração pino-disco	32
Figura 9 – Fluxograma das etapas da pesquisa.....	39
Figura 10 – Planejamento experimental dos ensaios realizados.....	42
Figura 11 – Tela inicial do Software Tribometer	43
Figura 12 – Aquisição por meio do complemento Surtronic Aquisition.....	43
Figura 13 – Suporte para as esferas de rolamento	44
Figura 14 – Dimensões dos discos usados nos ensaios de configuração pino-disco.....	45
Figura 15 – Tribômetro TRB ³	45
Figura 16 – Dispositivos usados nos testes de pino-disco.....	46
Figura 17 – Dimensões dos discos usados nos ensaios eletroquímicos	47
Figura 18 – Potenciostato AUTOLAB PGSTAT 302 N	47
Figura 19 – Conjunto utilizado nos testes eletroquímicos.....	48
Figura 20 – Informações importantes da pastilha TNMG 16 04 04 - QM H13A	49
Figura 21 – Fluxograma dos procedimentos experimentais de usinagem.....	53
Figura 22 – Microscópio Estéreo Stemi 2000-C	56
Figura 23 – Torno convencional utilizado nos experimentos.....	56
Figura 24 – Fixação da peça no torno.....	58
Figura 25 – Suporte para medições de desgaste	59
Figura 26 – Rugosímetro de superfície S-Series	59
Figura 27 – Sistema de medição do acabamento superficial da peça.....	60
Figura 28 – Microestruturas presentes no aço SAE 1045 utilizado na pesquisa.....	64
Figura 29 – Gráfico comparativo do coeficiente de atrito em cada condição estudada	66
Figura 30 – Comportamento do desgaste gerado no disco nos ensaios tribológicos	68
Figura 31 – Gráfico comparativo do Potencial de Circuito Aberto (OCP) das emulsões	69
Figura 32 - Gráfico comparativo do arco capacitivo para cada ensaio de impedância	70

Figura 33 – Gráfico de Polarização Linear para cada uma das emulsões	71
Figura 34 – Microscopia óptica da superfície das amostras metálicas do ensaio de polarização linear	72
Figura 35 – Curvas de vida da ferramenta para a velocidade de corte de 90 m/min.....	74
Figura 36 – Desgaste de Flanco Médio (VB_B) no fim de vida das arestas para $V_c = 90$ m/min	75
Figura 37 – Curvas de vida da ferramenta para a velocidade de corte de 70 m/min.....	76
Figura 38 – Desgaste de Flanco Médio (VB_B) no fim de vida das arestas para $V_c = 70$ m/min	77
Figura 39 – Curvas de vida da ferramenta para a velocidade de corte de 50 m/min.....	78
Figura 40 – Desgaste de Flanco Médio (VB_B) no fim de vida das arestas para $V_c = 50$ m/min	79
Figura 41 – Gráfico comparativo de custo por volume de produção para a $V_c = 90$ m/min....	84
Figura 42 – Gráfico comparativo de custo por volume de produção para a $V_c = 70$ m/min....	85
Figura 43 – Gráfico comparativo de custo por volume de produção para a $V_c = 50$ m/min....	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação qualitativa entre os diversos sistemas de lubrificação/refrigeração	34
Tabela 2 – Composições das emulsões a base de óleo vegetal (100 ml)	40
Tabela 3 – Composição da emulsão a base de óleo sintético (100 ml)	41
Tabela 4 – Condições padronizadas de corte	50
Tabela 5 – Série geométrica de números preferenciais	51
Tabela 6 – Características dos ensaios realizados	52
Tabela 7 – Composição química do aço SAE 1045	54
Tabela 8 – Possíveis configurações de parâmetros no torno	57
Tabela 9 – Intervalos de confiança para a variável aleatória <i>Coefficiente de atrito (μ)</i> para o para cada condição estudada	65
Tabela 10 – Intervalos de confiança para a variável aleatória <i>Desgaste no disco</i> para cada condição do experimento de configuração pino-disco	67
Tabela 11 – Intervalos de confiança para a variável aleatória <i>Tempo de vida da aresta cortante</i> para cada condição dos ensaios de usinagem	73
Tabela 12 – Temperaturas geradas em cada ensaio de usinagem	74
Tabela 13 – Intervalos de confiança para a variável aleatória <i>Rugosidade média das peças</i> para cada condição dos ensaios de usinagem	80
Tabela 14 – Custos de produção e descarte das emulsões	82
Tabela 15 – Custos de usinagem para diferentes velocidades de corte	83
Tabela 16 – Resumo da avaliação de viabilidade econômica	86

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
APC	Aresta Postiça de Corte
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
COMPOLAB	Laboratório de Materiais Compósitos e Integridade Estrutural
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i>
HRB	Dureza Rockwell B
HSS	<i>High Speed Steel</i>
HV	Dureza Vickers
INTM	Instituto Nacional de Tecnologia de União e Revestimento de Materiais
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LESD	Laboratório de Engenharia de Superfície e Desgaste
LN ₂	Nitrogênio Líquido
MQF	Mínima Quantidade de Fluido
MQL	Mínima Quantidade de Lubrificação
NaCl	Cloreto de Sódio
NBR	Norma Brasileira
NIOSHI	<i>National Institute for Occupational Safety and Health</i>
OCP	<i>Open Circuit Potential</i>
PIB	Produto Interno Bruto
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
UsiFAB	Plataforma de Usinagem e Fabricação
VB _B	Desgaste de Flanco Médio

LISTA DE SÍMBOLOS

#	Granulometria de lixas
a_p	Profundidade de corte
f	Avanço
Hz	Hertz
kW	kiloWatts
L_f	Comprimento usinado
m/min	Metros por minuto
mm	Milímetros
mm/rot	Milímetros por rotação
R_a	Desvio aritmético médio da rugosidade
rpm	Rotações por minuto
r_ϵ	Raio de quina
V	Volts
V/s	Volts por segundo
V_c	Velocidade de corte
W	Watt
α	Alpha
μ_e	Coefficiente de atrito
μm	Micrometros

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	OBJETIVOS DA PESQUISA	17
1.1.1	Objetivo geral	17
1.1.2	Objetivos específicos	17
1.2	ORGANIZAÇÃO DA PESQUISA	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1	FABRICAÇÃO SUSTENTÁVEL	19
2.2	USINAGEM	21
2.2.1	Torneamento	21
2.2.2	Principais problemas do calor em usinagem	21
2.2.3	Fluidos de corte	22
2.2.3.1	Tipos de fluidos de corte	22
2.2.3.2	Periculosidade dos fluidos de corte de origem mineral	26
2.2.4	Fluidos de corte alternativos	26
2.2.4.1	Óleos vegetais	27
2.2.5	Vida útil de ferramenta	28
2.3	ACABAMENTO SUPERFICIAL	30
2.4	TRIBOLOGIA	31
2.5	CORROSÃO	32
2.6	ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA	33
2.7	PESQUISAS RECENTES COM FLUIDOS DE CORTE ALTERNATIVOS	35
3	METODOLOGIA	39
3.1	CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA	39
3.2	MATERIAIS E MÉTODOS	39
3.2.1	Escolha das emulsões estudadas	40
3.2.2	Caracterização das propriedades tribológicas das emulsões	41
3.2.2.1	Metodologia dos ensaios	41
3.2.2.2	Preparação das amostras	44
3.2.2.3	Equipamento utilizado	45
3.2.3	Caracterização das propriedades corrosivas das emulsões	46
3.2.3.1	Preparação das amostras	46

3.2.3.2 Equipamento utilizado.....	47
3.2.3.3 Ensaios eletroquímicos.....	48
3.2.4 Ensaios de usinabilidade.....	49
3.2.4.1 Determinação dos parâmetros dos testes de usinagem.....	49
3.2.4.2 Material usinado.....	53
3.2.4.3 Caracterização do aço SAE 1045.....	54
3.2.4.4 Produção dos fluidos de corte e limpeza do reservatório de lubrificação/refrigeração do torno.....	55
3.2.4.5 Verificação preliminar da integridade da ferramenta de corte.....	55
3.2.4.6 Usinagem dos corpos de prova.....	56
3.3.4.7 Medição do desgaste das ferramentas.....	58
3.2.4.8 Mensuração da rugosidade.....	59
3.2.5 Análise de viabilidade econômica dos fluidos de corte biodegradáveis.....	60
4 RESULTADOS.....	64
4.1 CARACTERIZAÇÃO DO AÇO SAE 1045.....	64
4.2 CARACTERIZAÇÃO INFLUÊNCIA DAS EMULSÕES NAS PROPRIEDADES TRIBOLÓGICAS.....	65
4.2.1 Análise do coeficiente de atrito (μ_e).....	65
4.2.2 Análise do desgaste no disco.....	66
4.3 CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES CORROSIVAS DAS EMULSÕES.....	68
4.3.1 Análise de Potencial de Circuito Aberto (OCP).....	68
4.3.2 Análise de Impedância Eletroquímica.....	70
4.3.3 Análise de Polarização Linear.....	71
4.4 ANÁLISE DE USINABILIDADE.....	72
4.4.1 Análise de vida de ferramenta.....	72
4.4.2 Análise de acabamento superficial.....	80
4.5 ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA DOS FLUIDOS ESTUDADOS.....	81
4.5.1 Levantamentos de custos das emulsões.....	81
4.5.2 Análise econômica.....	84
5 CONCLUSÕES.....	87
5.1 PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS.....	88
REFERÊNCIAS.....	89
APÊNDICE A – CURVAS DE COMPORTAMENTO DO COEFICIENTE DE ATRITO NO ENSAIO DE CONFIGURAÇÃO PINO-DISCO.....	96

1 INTRODUÇÃO

A usinagem é uma grande família de processos de fabricação e abrange uma série de operações complexas e versáteis que contribuem com cerca de 5% do PIB dos países desenvolvidos, mostrando assim, sua relevância para o desenvolvimento de diversas nações (FRANÇA, 2018; JAYAL *et al.*, 2010). Todavia, tais processos enfrentam grandes desafios, tendo como principais vilões, o atrito entre ferramenta de corte/peça e ferramenta de corte/cavaco, o que conduz a elevadas temperaturas de corte.

Nesse contexto, os fluidos de corte convencionais são utilizados de maneira ampla para minimizar os problemas de diminuição da resistência à fadiga da peça (PU *et al.*, 2012), aumento da taxa de desgaste da ferramenta de corte (MACHADO *et al.*, 2009), e redução da qualidade da superfície usinada (M'SAOUBI *et al.*, 2014; JAWAHIR *et al.*, 2011) que são ocasionados durante o processo de usinagem. Além disso, esses fluidos e outros agentes auxiliares (óleos lubrificantes, óleos hidráulicos, graxas, etc.) possuem potencial altamente perigoso para a poluição do solo, do ar, da água, além de representar sério risco à saúde do trabalhador (BARROS *et al.*, 2017). Machado *et al.* (2015) afirmam que isso ocorre devido ao fato de tais fluidos serem produtos derivados do petróleo, apresentando uma alta toxicidade. Por essa razão, nos últimos anos, os óleos minerais vêm perdendo espaço na usinagem (CHETAN; GOSH; RAO, 2015).

A partir do cenário descrito acima, o tema usinagem sustentável vem ganhando força e se estabelecendo como prática fundamental no meio industrial, com foco na melhoria ambiental, segurança operacional e saúde do colaborador, além de gerar redução no custo do processo, consumo de energia e emissão de resíduos (JAWAHIR; DILLON, 2007).

Em decorrência dessa nova linha de pensamento, foram incrementados os fluidos sintéticos como uma alternativa eficaz para a redução dos problemas descritos acima, mesmo implicando em um elevado custo. Além disso, de maneira similar, muitos fluidos de corte alternativos, como os óleos vegetais, ésteres sintéticos e líquidos iônicos também estão sendo explorados por vários cientistas (LAWAL; HOUDHURY; NUKMAN, 2012).

Nesse sentido, os fluidos de corte derivados de óleo vegetal apresentam um alto potencial para serem utilizados nos processos de usinagem, pois são ecológicos, renováveis, altamente biodegradáveis e não tóxicos (DEBNATH; REDDY; YI, 2014). Contudo, o grande desafio é obter um fluido biodegradável com um bom desempenho no que se refere à vida da ferramenta de corte e que apresente um baixo custo.

1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA

Essa seção apresenta o objetivo geral e os objetivos específicos da pesquisa com o intuito de guiar o desenvolvimento dos procedimentos metodológicos e resultados do trabalho.

1.1.1 Objetivo geral

Realizar uma análise técnico-econômica de fluidos de corte a base de óleo babaçu, mamona e fluido comercial sintético em operações de usinagem do aço SAE 1045.

1.1.2 Objetivos específicos

1. Apresentar e comparar as características corrosivas e tribológicas de cada emulsão, por meio de ensaios eletroquímicos e de configuração pino-disco;
2. Avaliar a vida da ferramenta de corte na operação de torneamento utilizando as emulsões a base de óleo vegetal, fluido sintético e a seco, por intermédio da mensuração do VB_B (Desgaste de Flanco Médio);
3. Comparar o acabamento superficial gerado na usinagem a seco e como o uso das três emulsões, através da medição da rugosidade média (R_a);
4. Realizar uma análise econômica comparando o desempenho das três emulsões e do processo a seco mediante avaliação comparativa de custo por volume de produção;
5. Analisar a viabilidade de aplicação industrial dos fluidos de corte biodegradáveis.

1.2 ORGANIZAÇÃO DA PESQUISA

O texto da pesquisa foi dividido em cinco capítulos, com o objetivo de apresentar de forma organizada todas as informações e contribuições obtidas. Nesse sentido, o primeiro capítulo apresenta uma breve contextualização sobre a problemática, construindo assim uma justificativa para o estudo, culminando na apresentação dos objetivos gerais e específicos do trabalho.

De maneira complementar, o capítulo 2 busca embasar teoricamente a pesquisa, no sentido de apresentar o processo de usinagem e os tipos de fluidos estudados, bem como os temas de fabricação sustentável, tribologia, corrosão, vida de ferramenta, acabamento

superficial e análise econômica para fluidos de corte. Ao final do capítulo foram apresentadas algumas pesquisas recentes relacionadas à área em questão, de maneira a evidenciar a importância de sua contribuição.

O terceiro capítulo contém todos os aspectos metodológicos utilizados na pesquisa, por meio dos quais se torna possível caracterizar e entender o estudo de maneira detalhada. Nesse tópico aborda-se os materiais e métodos utilizados, bem como as características e parâmetros de cada ensaio realizado. Faz-se ainda uma abordagem explicativa sobre diversas considerações relativas à análise econômica que é apresentada nos resultados.

Os resultados e discussões do trabalho são apresentados no quarto capítulo, o qual expõe todas as informações obtidas a partir dos ensaios de usinabilidade, tribológicos e eletroquímicos realizados, facilitando a comparação técnica entre as três emulsões estudadas. De maneira complementar, são abordados os aspectos econômicos, visando evidenciar a viabilidade de aplicação industrial dos fluidos biodegradáveis.

Por fim, no quinto capítulo são apresentadas as principais conclusões geradas a partir dos resultados encontrados e as contribuições destes em relação aos objetivos do estudo. Além disso, são descritas as limitações da pesquisa e propostas de trabalhos futuros.

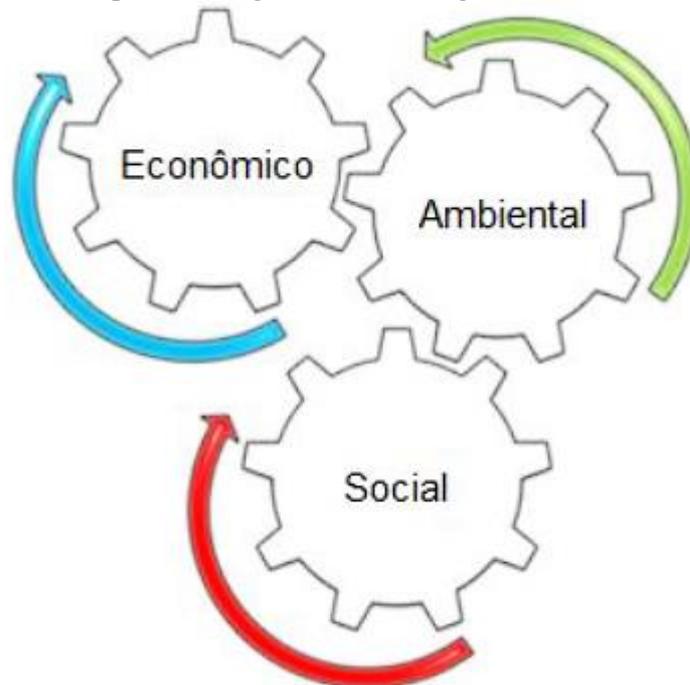
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta os principais conceitos relacionados ao desenvolvimento do trabalho, de modo a abordar uma visão macro do conteúdo, com uma estrutura que auxilie em seu entendimento.

2.1 FABRICAÇÃO SUSTENTÁVEL

De acordo com Jayal *et al.* (2010) a fabricação sustentável pode ser definida como a criação de produtos fabricados utilizando processos que minimizam os efeitos negativos dos impactos ambientais, conservam energia e recursos naturais, são seguros para funcionários, comunidades e consumidores, e são economicamente corretos. Sendo assim, um dos objetivos mais importantes da Manufatura Sustentável é o desenvolvimento de inovações viáveis em processos, materiais de engenharia e sistemas de fabricação para fornecer vários ciclos de vida dos produtos (DASSISTI *et al.*, 2019). Nesse contexto, Pulsavec, Krajnik e Kopac (2010) apresentam, na adaptação feita na Figura 1, os pilares da fabricação sustentável.

Figura 1 – Os pilares da fabricação sustentável

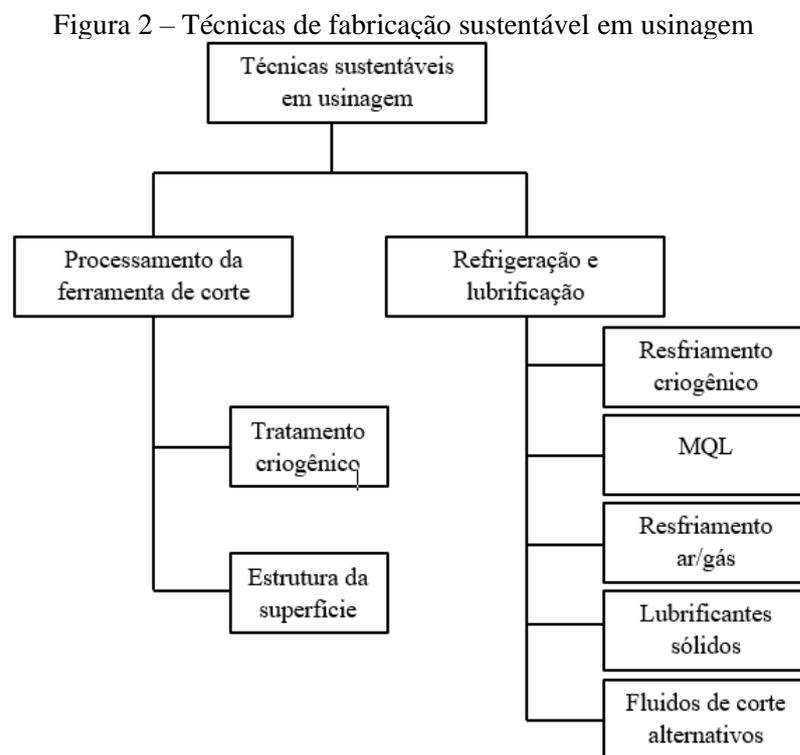


Fonte: Adaptado de Pulsavec, Krajnik e Kopac (2010).

Desse modo, como verificado na seção anterior e na Figura 1, a necessidade de mudar para a manufatura sustentável se deve a vários fatores, como aumento de doenças

ocupacionais entre os trabalhadores, políticas governamentais rígidas em relação ao meio ambiente e a necessidade de redução no custo total durante a fabricação (JAYAL *et al.*, 2010).

Contudo, tradicionalmente, os processos de manufatura se desenvolveram na busca por produtividade máxima com o menor custo possível, muitas vezes sem uma preocupação acerca de seus efeitos no meio ambiente, na saúde do trabalhador e na sociedade (UMBRELLO; MICARI; JAWAHIR, 2012). Desse ponto de vista, percebe-se que por não haver preocupação com a sustentabilidade, surgiu uma grande lacuna que começou a ser preenchida nos últimos anos. Com essa ótica, Chetan, Gosh e Rao (2015) compilaram as técnicas emergentes de fabricação sustentável no campo da usinagem no modelo apresentado na Figura 2.



Fonte: Chetan, Gosh e Rao (2015).

A partir da Figura 2, percebe-se que existem diversas técnicas sustentáveis no campo da usinagem, sendo algumas delas atreladas ao processamento da ferramenta de corte e outras à refrigeração e lubrificação durante a operação. Os autores supracitados, realizaram em seu trabalho uma revisão de todas as técnicas emergentes de fabricação sustentável e de produção limpa para a usinagem.

2.2 USINAGEM

Define-se usinagem como uma operação que ao conferir à peça forma, dimensões e acabamento, produz cavaco (MACHADO *et al.*, 2011). De um modo mais específico, Diniz, Marcondes e Coppini (2013) afirmam que termo “usinagem” descreve as operações da indústria que envolvem remoção de material na forma de cavaco através da ação de ferramentas de corte.

De acordo com EEEP (2010), os processos de usinagem podem ser divididos em processos de usinagem não convencionais (plasma, laser, jatos abrasivos, ultrassom, eletro-erosão, entre outros) e convencionais (torneamento, fresamento, aplainamento, estampagem, furação, entre outros). Vale ressaltar que dentre os processos não convencionais, a usinagem a plasma e a laser não atuam com remoção de cavaco. Contudo, na pesquisa em questão será dado um enfoque no processo de torneamento.

2.2.1 Torneamento

O torneamento é um processo mecânico de usinagem que se destina à obtenção de superfícies de revolução com o auxílio uma ou mais ferramentas monocortantes. Nessa operação a peça gira em torno de um eixo principal de rotação da máquina e a ferramenta se desloca seguindo uma trajetória coplanar com o referido eixo. Apesar de sua versatilidade, o torneamento apresenta alguns problemas, gerando limitações (FERRARESI, 1977; HAMMES; ROSA; WALKER, 2017).

2.2.2 Principais problemas do calor em usinagem

De acordo com Machado *et al.* (2015), o custo da usinagem pode ser reduzido aumentando-se a velocidade de corte e/ou a velocidade de avanço, porém, há limites para essas velocidades, acima dos quais a vida da ferramenta de corte é drasticamente reduzida. Isso ocorre porque a potência de usinagem é convertida em energia térmica, acelerando o processo de desgaste da ferramenta de corte, sendo este um dos principais problemas da operação.

Sendo assim os autores supracitados complementam que é importante compreender quais fatores influenciam a geração de calor, bem como de que maneira os fluxos de calor e as temperaturas são distribuídos na ferramenta e na peça para, a partir desses aspectos, avaliar alternativas de diminuição do aporte térmico. Desse modo, se a lubrificação e a refrigeração

não forem satisfatórias, as elevadas temperaturas geradas podem produzir danos à peça, como queima superficial, mudanças microestruturais, aparecimento de tensões residuais, erros de forma e deterioração de sua qualidade final (MALKIN, 1989; GUO, 1999; ALVES; BIANCHI; AGUIAR, 2010).

2.2.3 Fluidos de corte

Os fluidos de corte são compostos que têm suas principais funções relacionadas à refrigeração e à lubrificação da região de corte. Nesse contexto, suas propriedades térmicas são fatores determinantes para a eficiência da lubrificação e refrigeração da zona de corte. De maneira complementar, os fluidos de corte podem desempenhar outros papéis, como transportar os cavacos para fora da região de corte e proteger a peça, a máquina-ferramenta e a ferramenta contra a oxidação (MACHADO *et. al.*, 2015; LISBOA; MORAES; HIRASHITA, 2013). Sendo assim, Oyafuso e Silva (2018) afirmam que existem inúmeras vantagens no uso do fluido de corte, o que consiste em um fator de competitividade entre as empresas, já que causa aumento da qualidade do produto.

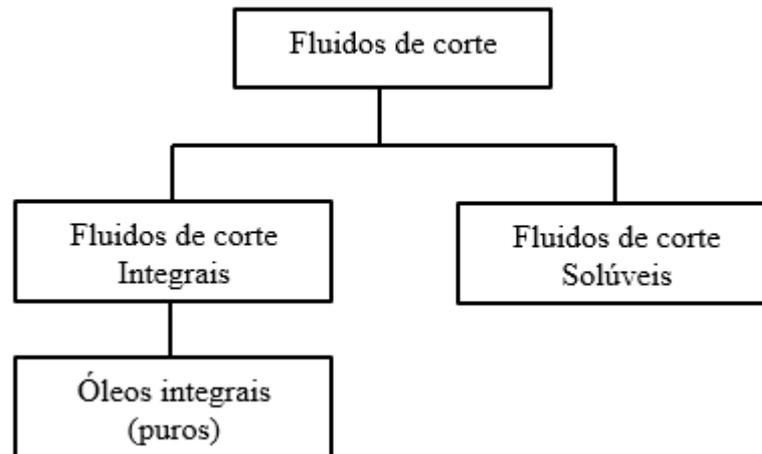
2.2.3.1 Tipos de fluidos de corte

De acordo com França (2018), tem-se atualmente uma grande variedade de fluidos de corte disponíveis no mercado, contudo devido à constante evolução tecnológica das operações de usinagem, suas formulações se tornaram cada vez mais complexas. Sendo assim, sua classificação é complicada, tendo em vista as diversas abordagens adotadas por pesquisadores da área.

Machado *et al.* (2009) afirma que embora a utilização de fluidos de corte gasosos e sólidos seja eventualmente descrita na literatura técnica, os fluidos de corte líquidos representam a grande maioria nas aplicações em operações de usinagem. Esta situação pode ser creditada principalmente à inviabilidade econômica dos fluidos gasosos e sólidos. Complementando este pensamento, os autores citados acima informam que os fluidos líquidos são agrupados nas seguintes categorias: óleos, emulsões e soluções.

Compactuando parcialmente com esta ideia Committee (1991) propôs uma classificação simplificada e concisa, apresentada na Figura 3.

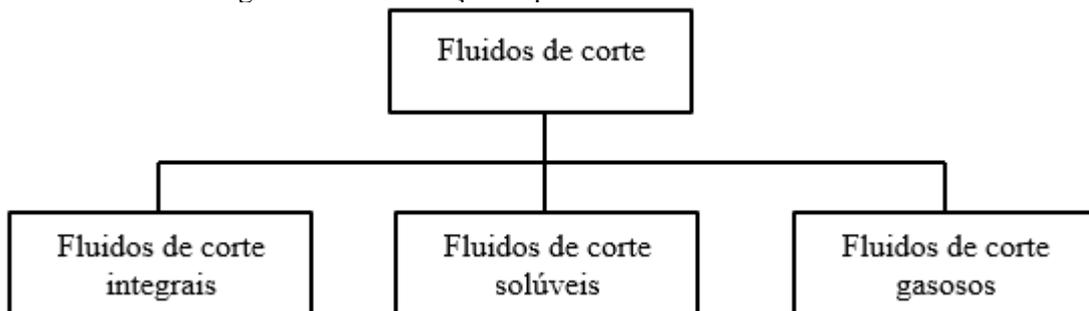
Figura 3 - Tipos básicos de fluido de corte



Fonte: Committee (1991).

Como é perceptível na classificação da Figura 3, as classes de fluidos de corte gasosos e sólidos foram excluídas, de maneira a contemplar apenas os fluidos de corte líquidos, que são utilizados de forma ampla na indústria metal mecânica. Contudo, de maneira divergente, mas complementar El Baradie (1996) apresentou outro tipo de classificação, exibida na Figura 4.

Figura 4 - Classificação esquemática dos fluidos de corte



Fonte: El Baradie (1996).

Ao visualizar a Figura 4 é fácil identificar que a diferença básica em relação à classificação da Figura 3, é inclusão dos fluidos de corte gasosos, que apresentam poucas aplicações práticas.

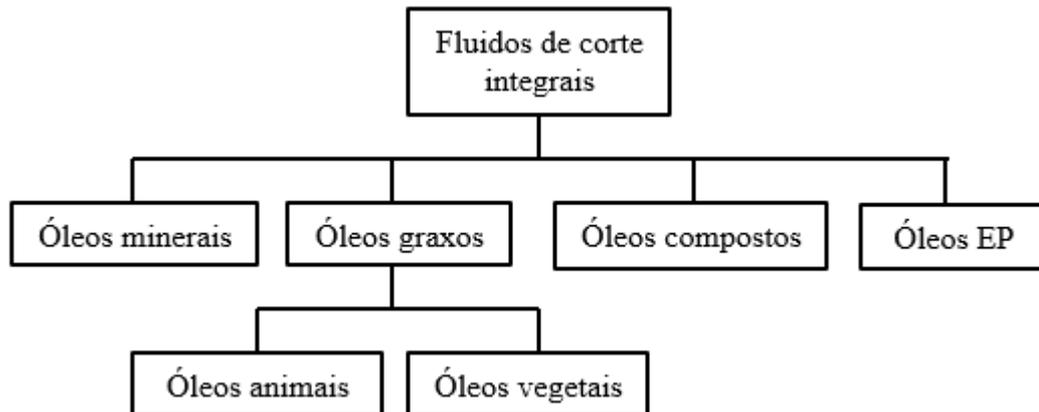
❖ Fluidos de corte integrais

Os óleos integrais têm como composto básico o óleo mineral, podendo ser utilizados no estado puro (sem aditivação) ou aditivados (presença de aditivos polares e/ou aditivos químicos ativos ou inativos). Sendo assim, os óleos integrais possuem excelente propriedade de lubrificação e pouca capacidade de refrigeração. Além disso, tais fluidos são considerados insolúveis em água, ocasionando riscos à saúde do operador e à segurança do processo,

devido à baixa propriedade de refrigeração e sua alta inflamabilidade, sendo esses os fatores limitantes de sua aplicação na usinagem (TESSARO, 2008; FRANÇA, 2018).

Segundo Diniz, Marcondes e Coppine (2013), a subdivisão dos fluidos de corte integrais aplicados na usinagem segue o esquema apresentado na Figura 5.

Figura 5 – Principais tipos de fluidos de corte integrais



Fonte: Diniz, Marcondes e Coppine (2013).

Os óleos minerais são hidrocarbonetos formados a partir do refinamento do petróleo cru. Sendo assim, suas propriedades dependem do comprimento da cadeia, estrutura e grau de refinamento. Contudo o emprego desses óleos como fluidos de corte tem perdido espaço para os óleos solúveis em água nos últimos anos. Isso ocorreu devido a diversos fatores, tais como: alto custo relativo, risco de fogo, ineficiência a altas velocidades de corte, baixo poder refrigerante e formação de fumos que oferecem riscos à saúde do operador (MACHADO *et al.*, 2015).

Os óleos graxos, que compreendem os de origem animal e vegetal, foram os primeiros lubrificantes empregados como fluidos de corte integrais. Apresentam boa capacidade de lubrificação e molhabilidade, bem como uma refrigeração razoável. Contudo sua aplicação tornou-se inviável devido ao seu alto custo e rápida deterioração. Desse modo, atualmente são utilizados como aditivos nos fluidos minerais, visando melhorar suas propriedades lubrificantes (DINIZ; MARCONDES; COPPINE, 2013; MACHADO *et al.*, 2015).

Adicionalmente, os óleos compostos são óleos minerais que apresentam de 10 a 30% de óleos graxos em sua composição. Por fim, os óleos EP (Extrema Pressão) são fluidos de corte que recebem aditivos em sua composição para trabalhar em elevadas pressões sem haver vaporização (DINIZ; MARCONDES; COPPINE, 2013).

❖ Fluidos de corte solúveis

Os fluidos de corte solúveis são basicamente óleos minerais misturados com emulsificantes. Desse modo, ao adicionar e agitar a mistura em água, forma-se uma emulsão de óleo e água. Esses fluidos são usados principalmente em operações de alta velocidade por possuir melhor propriedade de refrigeração. Tais fluidos são geralmente classificados como óleos emulsificáveis, sintéticos ou semissintéticos (EL BARADIE, 1996; LAWAL; CHOUDHURY; NUKMAN, 2012).

Segundo Machado *et al.* (2015) os fluidos emulsificáveis são compostos bifásicos de óleos minerais adicionados à água na proporção de 1:10 a 1:100, mais agentes emulgadores que garantem a miscibilidade destes com a água. Dessa forma, geralmente são usados para operações de alta velocidade pois, nessas condições, o aumento da temperatura é significativo. Sendo assim, a presença de água torna a refrigeração altamente eficaz e a presença de óleo reduz ou elimina a tendência da água causar oxidação (KALPAKJIAN; SCHMID, 2010).

De maneira complementar, os autores supracitados afirmam que os óleos sintéticos podem ser considerados como produtos químicos com aditivos, diluídos em água e contendo óleo. Além disso, este tipo de fluido apresenta maior efeito de resfriamento e, diferentemente das emulsões, eles não são sensíveis à dureza da água e são transparentes, o que permite uma boa visibilidade durante a usinagem (BENEDICTO; CAROU; RUBIO, 2017).

Por fim, os óleos semissintéticos se caracterizam por apresentarem de 5% a 50% de óleo mineral no fluido concentrado com aditivos e compostos químicos que verdadeiramente dissolvem-se na água formando moléculas individuais. Dessa maneira, a menor quantidade de óleo mineral e a presença de biocidas, aumentam a vida do fluido de corte e reduzem os riscos à saúde. Por outro lado, fluidos semissintéticos com um teor de óleo superior a 40% proporcionam lubrificação e melhor proteção contra corrosão do que aqueles com maior teor de água. Sendo assim, eles são mais eficazes em usinagem em alta velocidade (BENEDICTO; CAROU; RUBIO, 2017; MACHADO *et al.*, 2015).

❖ Fluidos de corte sólidos e gasosos

Como apresentado anteriormente, os fluidos de corte gasosos não apresentam aplicações práticas na indústria da usinagem devido a limitações de viabilidade econômica, entre outros fatores. O principal representante dessa classe é o ar comprimido que pode ser utilizado com o objetivo de resfriar a região de corte, por meio de um jato, puro ou misturado a outro fluido (MACHADO *et al.*, 2015). Analogamente, Diniz, Marcondes e Coppine (2013) informam que os fluidos de corte sólidos objetivam apenas reduzir o coeficiente de atrito da

interface ferramenta/cavaco, sendo esta uma aplicação restrita devido à necessidade de interromper a operação para a reaplicação do produto.

2.2.3.2 Periculosidade dos fluidos de corte de origem mineral

Mesmo que os fluidos de corte feitos a partir de óleo mineral se apresentem como produtos que ofereçam melhorias em operações de usinagem, ainda afetam o meio ambiente, por serem fluidos não neutralizáveis, causando poluição de várias maneiras. Conseqüentemente, tais fluidos também são prejudiciais à vida dos seres vivos, a menos que sua concentração seja neutralizada ou diluída (SAIKIRAN; RAVALI; KUMAR, 2019).

De acordo com Lawal, Choudhury e Nukman (2012), dados relatados indicam que 80% das doenças ocupacionais de pele são causadas pelos fluidos de corte de base mineral. Além disso, Hannu *et al.* (2013) sugerem em seu estudo que estes fluidos são a causa de doenças respiratórias e de pele dos trabalhadores. Portanto, a partir deste ponto de vista, é importante erradicar ou reduzir substancialmente o uso desses fluidos na usinagem (CHETAN; GOSH; RAO, 2015).

Em relatório emitido pelo NIOSHI (Instituto Nacional de Segurança e Saúde Ocupacional) foi informado que mais de 1 milhão de trabalhadores encontram-se sobre a influência de efeitos toxicológicos causados pelos fluidos de corte de origem mineral. Para superar esses desafios, várias alternativas estão atualmente sendo exploradas por cientistas e tribologistas, incluindo o uso de lubrificantes sintéticos, sólidos e de base vegetal (LAWAL; HOUDHURY; NUKMAN, 2012).

2.2.4 Fluidos de corte alternativos

Na maioria dos processos de usinagem, os fluidos de corte miscíveis em água e em óleo mineral estão sendo empregados fortemente para fins de refrigeração e lubrificação. Sendo assim, para superar estes diversos desafios, muitos fluidos de corte alternativos estão sendo explorados, tais como óleos vegetais, ésteres sintéticos e líquidos iônicos. Dentre esses, os dois primeiros são os mais populares (LAWAL, HOUDHURY; NUKMAN, 2012; CHETAN; GOSH; RAO, 2015).

De maneira geral, os óleos vegetais são ecológicos, renováveis, altamente biodegradáveis e não apresentam toxicidade por natureza, sendo considerados candidatos potenciais a substituir os fluidos de corte a base de petróleo. Em contrapartida, os ésteres

sintéticos são os óleos vegetais modificados quimicamente, tendo um alto nível de estabilidade e resistência a corrosão, além de possuírem boa degradabilidade e atributos toxicológicos (DEBNATH; REDDY; YI, 2014; SINIAWSKI *et al.*, 2007; WEINERT *et al.*, 2004; CHETAN; GOSH; RAO, 2015). Todavia, o foco principal deste trabalho são os óleos vegetais, sendo suas características apresentadas mais detalhadamente no tópico a seguir.

2.2.4.1 Óleos vegetais

Na idade média já se fazia uso de fluidos de corte compostos por gordura animal ou vegetal. Devido a questões relacionadas a disponibilidade e redução de custos, estas matérias primas foram substituídas pelos óleos minerais por volta do século XIX. Contudo, na atualidade existe uma nova tendência buscando o uso de tais fluidos, principalmente na indústria (DEBNATH; REDDY; YI, 2014; OSAMA *et al.*, 2017).

Geralmente, a maioria dos óleos vegetais consiste em uma cadeia de longa estrutura de triglicerídeos que é responsável por suas propriedades tribológicas aprimoradas. Desse modo, além de boas propriedades de lubrificação, o óleo vegetal também apresenta certas desvantagens, como baixa estabilidade térmica, alto ponto de congelamento e baixa proteção contra corrosão (CHETAN; GOSH; RAO, 2015).

De modo complementar, Debnath, Reddy e Yi (2014) afirmam que os óleos vegetais não apenas fornecem um filme lubrificante de alta resistência que interage fortemente com as superfícies metálicas, como também reduz o atrito e o desgaste. Isso ocorre porque as polaridades do ácido graxo disponibilizam filmes moleculares orientados produzindo oleosidade, conferindo propriedades antidesgaste.

De acordo com Aluyor, Kessington e Mudiakeoghene (2009) os óleos vegetais são obtidos de sementes oleaginosas que contenham frutos ou nozes que podem ser extraídos por métodos envolvendo pressão, extração por solventes ou a combinação destes. Nesse contexto, o Brasil é o país com maior capacidade de expansão de sua produção de oleaginosas devido às suas condições climáticas e seu solo fértil, sem afetar a produção de alimentos e o desmatamento das áreas florestais (MORAIS, 2014; TOMAS *et al.*, 2012). A Figura 6 apresenta como ocorre a exploração de óleo vegetal no Brasil.

Figura 6 – Produção de óleos vegetais no território brasileiro



Fonte: Adaptado FERRÉS (2003) e TOMAS *et al.* (2012).

Avaliando a Figura 6, percebe-se que na região nordeste se encontra grande disponibilidade de produção de óleos de babaçu, soja, mamona, palma e algodão, acentuando ainda mais a possibilidade do uso dessa matéria-prima como constituinte de fluidos de corte para a indústria da usinagem, visto que espécies da Caatinga, bioma predominante da região, são potencialmente úteis como fontes de óleo de sementes (SILVA *et al.*, 2014; PINHO; OLIVEIRA; SILVA, 2009).

Tendo como princípio essa disponibilidade de matéria-prima, o maior desafio é obter um fluido biodegradável com um bom desempenho na vida da ferramenta e de baixo custo, ou seja, viável para aplicações industriais. Sendo assim, os próximos tópicos deste capítulo abordarão as análises necessárias à validação dessa viabilidade, tais como aspectos técnicos (vida útil de ferramenta e acabamento superficial) e econômicos.

2.2.5 Vida útil de ferramenta

Segundo Machado *et al.* (2009), por maior que seja a dureza e a resistência ao desgaste das ferramentas de corte, e por menor que seja a resistência mecânica da peça de trabalho, a ferramenta de corte sofrerá um processo de desgaste que mais cedo ou mais tarde exigirá a sua substituição. Conseqüentemente, a confiabilidade do processo de corte, a qualidade das peças produzidas e a produtividade do processo de usinagem dependem da vida da ferramenta de corte. Uma falha inesperada da ferramenta de corte pode levar a um tempo

de inatividade dispendioso do equipamento de processo e até parar toda a linha de produção (ANTSEV, 2019).

Sendo assim, embora o custo da ferramenta de corte seja inferior a 4% do custo de usinagem, a troca ou reafiação da ferramenta representa de 10 a 40 % do tempo total de inatividade das máquinas e afeta indiretamente até 30% do custo total de usinagem (ASTAKHOV; DAVIM, 2019; LIU *et al.*, 2018; SUN *et al.*, 2020). Devido a isso, atualmente, muitos trabalhos são dedicados a previsão da vida útil e confiabilidade de ferramentas de corte (VAGNORIUS; RAUSAND; SØRBY, 2010; RODRIGUEZ; SOUZA, 2010; DING; HE, 2011; SALONITIS; KOLIOS, 2014).

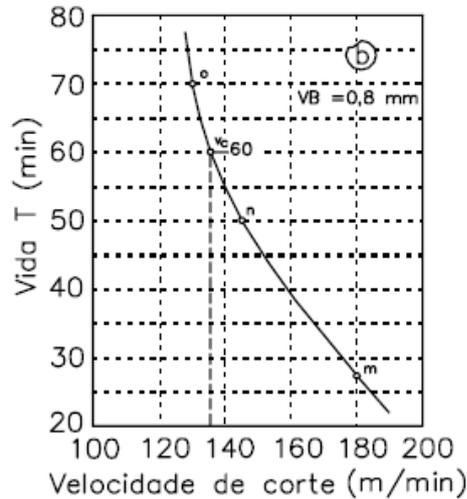
Diniz, Marcondes e Coppine (2014), afirmam que a vida da ferramenta é o tempo em que a mesma trabalha efetivamente, até perder sua capacidade de corte, dentro de um critério previamente estabelecido. Desse modo, podem-se distinguir três fenômenos pelos quais uma ferramenta de corte perde sua eficácia na usinagem: avaria, desgaste e deformação plástica, apesar de alguns autores considerarem a deformação plástica apenas um mecanismo de desgaste (TRENT; WRIGHT, 2000). Machado *et al.* (2009) define que:

- **Avaria** é um fenômeno que ocorre de maneira repentina e inesperada, causado pela quebra, lascamento ou trinca da aresta de corte;
- **Desgaste** é mudança de sua forma original durante o corte, resultante da perda gradual de material (ISO 3685, 2017);
- **Deformação plástica** é mudança da geometria da aresta de corte pelo deslocamento de material.

Mesmo se a ferramenta de corte possuir tenacidade suficiente para evitar uma avaria, estará sempre sujeita ao desgaste. Em linhas gerais, a progressão do desgaste e consequentemente a redução da vida da ferramenta são influenciados principalmente pela velocidade de corte, depois pelo avanço e, por último, pela profundidade de corte (DINIZ; MARCONDES; COPPINE, 2014; MACHADO, *et al.*, 2009).

Para expressar os parâmetros apresentados até agora, usa-se a curva de vida da ferramenta, que é o gráfico de tempo de vida (T) em função da velocidade de corte (V_c). A curva de vida é expressa em termos da velocidade de corte por ser o parâmetro de maior influência no desgaste de uma ferramenta (MACHADO *et al.*, 2009). A Figura 7 apresenta um exemplo de curva de vida da ferramenta.

Figura 7 – Curva de vida de ferramenta



Fonte: Feraresi (1977).

Segundo os autores supracitados, a expressão $T = K \cdot V_c^{-x}$, conhecida como a equação de Taylor, representa o tempo de vida de uma ferramenta para uma determinada velocidade de corte, sendo usada como fórmula base para a criação da curva de vida apresentada na Figura 7. Sendo assim, percebe-se que deve ser desenvolvido um modelo adequado de ciclo de vida da ferramenta de corte para determinar melhor todos os custos relacionados as propriedades das ferramentas (BRENNER *et al.*, 2018).

Em processos de torneamento, a norma mais utilizada para medir a vida de ferramentas de corte é a ISO 3685. Esta norma apresenta os procedimentos recomendados para os ensaios de desgaste em ferramentas de aço-rápido, metal duro e cerâmica, utilizadas para usinar aço e ferro fundido, estabelecendo especificações de peças, ferramentas, fluidos de corte, condições, equipamentos, avaliação da deterioração e vida da ferramenta, métodos de ensaio, gravação de dados, avaliação e apresentação dos resultados de corte (ISO 3685, 2017).

2.3 ACABAMENTO SUPERFICIAL

Segundo Plaza, López e González (2019), o acabamento superficial de uma peça usinada é indicativo da qualidade do produto e do processo, além de ser um aspecto essencial para otimizar as condições de corte. Este acabamento depende muito da relação entre o avanço e o raio de ponta. Sendo assim, o aumento do raio de ponta torna a ponta da ferramenta mais resistente, mas também aumenta sua vibração devido ao aumento do atrito causado pela maior área de contato com a peça. Além disso, é perceptível que a rugosidade cresce com o aumento do avanço (DINIZ, MARCONDES; COPPINE, 2014).

A rugosidade média (R_a) é utilizada como dado de saída para controlar a qualidade do produto usinado. A rugosidade de uma superfície depende de vários parâmetros, tais como a máquina-ferramenta, as propriedades do material da peça, a geometria e o material da ferramenta, além da operação de usinagem (MACHADO *et al.*, 2009; GARCIA; NÚÑES, 2018).

A Norma ABNT NBR ISO 4287 (2002) apresenta vários parâmetros para avaliar a rugosidade de peças, tendo cada parâmetro, sua própria peculiaridade. Contudo, como evidenciado anteriormente, o mais utilizado é o R_a , uma vez que alterações no seu valor representam alterações no processo, em especial no desgaste da ferramenta (MUMMERY, 1992; MACHADO *et al.*, 2009). Sendo assim, neste trabalho será realizada uma análise de base estatística relacionada aos dados obtidos em avaliações da rugosidade média (R_a) nas peças advindas dos ensaios de vida de ferramenta.

2.4 TRIBOLOGIA

De acordo com Radi *et al.*, (2007) a tribologia reúne os conhecimentos adquiridos na física, na química, na mecânica e na ciência dos materiais para explicar e prever o comportamento de sistemas físicos que são utilizados em sistemas mecânicos, voltando seu foco para o estudo de superfícies interativas. Sendo assim, um dos principais focos de estudo da tribologia é o desgaste (KATO; ADACHI, 2001).

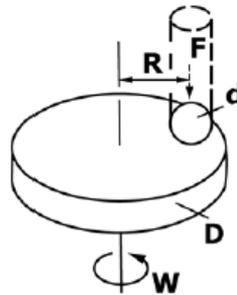
Trent e Wright (2000) afirmam que a literatura apresenta variações na classificação dos mecanismos de desgaste em ferramentas de corte, porém, grande parte dos trabalhos existentes considera pelo menos seis mecanismos diferentes, sendo eles:

- Cisalhamento plástico e altas temperaturas;
- Deformação sob tensão de compressão;
- Difusão;
- Aderência e arrastamento: *Attrition*;
- Abrasão;
- Desgaste de entalhe.

O ensaio mais utilizado para avaliar propriedades tribológicas é o teste de desgaste de configuração pino-disco. Este método de teste é um procedimento laboratorial para determinar o desgaste de materiais durante o deslizamento usando um aparelho de pino-disco. Nesse caso, duas amostras são exigidas, sendo uma delas, um pino com uma ponta

arredondada, que é posicionado perpendicularmente à outra, que geralmente é um disco circular plano (ASTM G99, 2017). A Figura 8 apresenta um esquema ilustrativo deste experimento.

Figura 8 – Ensaio na configuração pino-disco



Fonte: ASTM G99 (2017).

2.5 CORROSÃO

A corrosão pode ser descrita como uma deterioração de um material, por ação química ou eletroquímica do meio ambiente que pode estar associada ou não a esforços de natureza mecânica. Sendo assim, a influência mais acentuada na ação corrosiva é relativa à umidade, isto acontece devido a taxa de corrosão ser diretamente proporcional ao seu aumento (GENTIL, 2007).

Dessa maneira, levando em consideração a utilização de fluidos de corte, esta se torna uma situação propícia a existência de corrosão, portanto é importante avaliar o nível de sua atuação em emulsões usadas em usinagem, principalmente aquelas a base de óleo vegetal, pois como já apresentado anteriormente estes promovem baixa proteção contra este fenômeno.

Em meios aquosos técnicas eletroquímicas podem ser utilizadas na avaliação, controle e investigação da corrosão de metais que sofrem diferentes tipos de ataque corrosivo. Isso acontece devido à presença da superfície metálica, tendo em vista que neste cenário as reações básicas responsáveis pela corrosão são eletroquímicas (WOLYNEC, 2013). Sendo assim, nesta pesquisa foram utilizadas técnicas de corrosão eletroquímica como potencial de circuito aberto, impedância eletroquímica e polarização linear, para determinar aspectos relativos à proteção contra a corrosão advinda dos fluidos de corte estudados.

2.6 ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA

De acordo com Garcia, Rubio e Carou (2015) a principal função dos fluidos de corte é refrigerar e lubrificar. Portanto, o uso de fluidos de corte ajuda a reduzir o consumo de energia e protegem a superfície usinada, ferramentas e partes de máquinas-ferramentas da corrosão. Desse modo, eles têm sido comumente usados para aumentar a produtividade e a qualidade na usinagem (BENEDICTO; CAROU; RUBIO, 2017). Entretanto, o rápido aumento dos preços dos produtos petrolíferos, maior dependência de fontes *offshore*, menor taxa de produção e a taxa decrescente de novas reservas, também são algumas das razões para remover óleos de base mineral desta atividade industrial (SHOKRANI; DHOKIA; NEWMAN, 2012; MADANHIRE; MBOHWA, 2016).

Nesse contexto, o custo é uma grande barreira no desenvolvimento de lubrificantes sustentáveis, pois os preços do óleo vegetal não são competitivos comparando com os preços do mercado mundial de muitos óleos minerais, sendo eles, na maioria dos casos, de 1 a 8 vezes mais caros do que um fluido de base mineral. Em contrapartida, o uso destes fluidos pode ajudar a aumentar a vida da ferramenta de corte e gerar uma produção mais limpa, reduzindo os custos e aumentando a competitividade da empresa (HOSSEINI; SHABGARD; PILEHVARIAN, 2015; KURAM *et al.*, 2013; MADANHIRE; MBOHWA, 2016).

Cerca de 16% do custo total de usinagem está relacionado ao uso de fluidos de corte convencionais. Especificamente na usinagem de materiais endurecidos estes custos podem ser até maiores, chegando a 30% do custo total de fabricação, representando por volta de quatro vezes o custo com ferramentas. Relacionado ao percentual acima 22% é gasto com descarte do fluido (WALKER, 2013; SHOKRANI; DHOKIA; NEWMAN, 2012).

Tendo em vista a representatividade dos custos relacionados a fluidos de corte nas operações de usinagem, deve-se dar ênfase em seus fatores influenciadores. Sendo assim, para a avaliação de custos de um sistema de fluidos de corte deve ser levado em consideração os seguintes fatores (HUBBARD; CALLAHAN; STRONG, 2008; BENEDICTO; CAROU; RUBIO, 2017):

- Custo de compra dos fluidos de corte;
- Custo de limpeza das peças e de operações secundárias para remover o filme lubrificante da superfície e evitar contaminação entre diferentes processos de fabricação (MADANCHI; WINTER; HERRMANN, 2015);
- Custo da água para diluir os fluidos de corte emulsificáveis concentrados e para compensar as perdas por evaporação (ZHAO; OGALDEZ; SUTHERLAND, 2012);

- Custo relativo à energia elétrica, visto que estudos recentes indicam que o uso de fluidos cortantes tem uma influência significativa em até 50% da demanda total de energia (MADANCHI; WINTER; HERRMANN, 2015);
- Custos associados à substituição do fluido devido ao arraste ocasionado pelo contato com os cavacos e peça de trabalho. Sendo assim, certa quantidade de fluido deve ser adicionada para atingir a concentração e o nível requerido (MIJANOVIC; SOKOVIC, 2001);
- Custos do sistema de suprimento de fluidos, como recirculação e filtragem de fluidos;
- Custos de manutenção associados aos aditivos utilizados para prolongar a vida útil dos fluidos;
- Custos das tarefas de manutenção associadas ao bombeamento, limpeza e reabastecimento;
- Custos de tratamento e disposição de fluidos, pois estes podem causar poluição do ar e do solo e, contaminação de águas superficiais e subterrâneas (HADAD; SHARBATI, 2016);
- Custos associados à redução e manutenção de um baixo nível de exposição dos trabalhadores a fluidos cortantes (HUBBARD; CALLAHAN; STRONG, 2008), ou seja, relacionados a operações insalubres e perigosas.

A partir de tais afirmações, Benedicto, Carou e Rubio (2017) também apresentam na Tabela 1 uma comparação qualitativa entre os diversos sistemas de fluidos de corte.

Tabela 1 – Comparação qualitativa entre os diversos sistemas de lubrificação/refrigeração

	Custos					
	Matéria-prima	Consumo de fluido	Equipamento	Ferramenta	Limpeza	Descarte
Fluidos de corte convencionais	2	5	4	3	5	5
Usinagem a seco	1	1	1	5	1	1
MQL	2	2	3	2	2	2
Lubrificantes sólido	4	3	3	3	3	4
Resfriamento criogênico	3	3	5	3	1	1
Resfriamento gasoso	3	3	4	4	1	1
Fluidos de corte biodegradáveis	3	4	4	2	4	3
Nanofluidos	5	4	4	3	4	5

Legenda: 1-“Muito baixo”; 2-“baixo”; 3-“médio”; 4-“alto”; 5-“muito alto”.

Fonte: Adaptado de Benedicto, Carou e Rubio (2017).

De acordo com a Tabela 1 é possível perceber que os maiores custos com fluidos de corte biodegradáveis são com o consumo do fluido, equipamento e limpeza, sendo considerados apenas como “altos” do ponto de vista qualitativo apresentado. Portanto, é importante existir uma avaliação aprofundada de sua utilização visto que podem melhorar o desempenho da usinagem, aumentar a vida útil da ferramenta e realizar uma produção mais limpa (KURAM *et al.*, 2013).

2.7 PESQUISAS RECENTES COM FLUIDOS DE CORTE ALTERNATIVOS

Diversos grupos de pesquisa estão desenvolvendo trabalhos utilizando fluidos de corte alternativos tendo como base, principalmente, o uso de óleos vegetais, que apresentam um enorme potencial de utilização no setor manufatureiro (JULIEB *et al.*, 2003; JOHN; BHATTACHARYA; RAYNOR, 2004; SINGH; GUPTA, 2006; RAYNOR; KIM; BHATTACHARYA, 2005; SASHIDHARA; JAYARAN, 2010). Dessa forma, a seguir serão abordadas algumas pesquisas recentes com relação a este tema.

Katna *et al.* (2017), em sua pesquisa, usaram como base o óleo de nim não-comestível utilizando um emulsionante ecologicamente correto, tornando o fluido de corte totalmente biodegradável. O óleo de nim, por apresentar propriedades antimicrobianas inerentes, previne a contaminação microbiana por um longo período, além de não exigir neutralização antes da eliminação. Sendo assim, vários fluidos de corte foram formulados e então feitos experimentos de torneamento no aço carbono EN8 (semelhante ao SAE 1045) com insertos de metal duro sem revestimento. Como conclusão, os autores verificaram que o óleo nim propiciou melhores resultados quando comparado com o fluido de corte convencional em relação aos seguintes quesitos: temperatura de corte, forças de corte, desgaste da ferramenta e rugosidade superficial.

Gajrani, Ram e Sankar (2017) realizaram uma comparação do potencial de biodegradabilidade e usinagem do aço AISI H-13 endurecido, usando um fluido de corte biodegradável e um óleo mineral por meio das técnicas de inundação e mínima quantidade de fluido de corte (MQL). Durante o estudo foi possível concluir que a viscosidade e o ponto de inflamação do fluido de corte biodegradável eram mais altos do que os do óleo mineral resultando em melhor desempenho de lubrificação e segurança para usinagem do aço AISI H-13 endurecido. Além disso, no que se refere a biodegradabilidade, o fluido alternativo mostrou-se 96,67% biodegradável, diferentemente do mineral que foi apenas 18,32%. Por

fim, verificou-se que ambos os fluidos produziram bons resultados em termos de força de corte, força de avanço, coeficiente de atrito e rugosidade da superfície usinada.

Tazehkandi, Shabgard e Pilehvarian (2015) investigaram as influências dos parâmetros de corte nas componentes da força de usinagem, rugosidade da superfície e na temperatura de corte no torneamento de Inconel 740. Foram avaliados dois métodos de lubrificação: por inundação e por pulverização de nitrogênio líquido com fluido de corte vegetal biodegradável em combinação com ar comprimido, a fim de fazer uma redução drástica no consumo de fluido de corte. Os resultados mostraram que o uso de nitrogênio líquido em combinação com o modo de pulverização do fluido de corte e do ar comprimido, não só reduziu as forças de usinagem e a temperatura de corte, como também, em todos os testes experimentais, o consumo de fluido de corte foi menor do que por inundação, sendo possível atingir altas velocidades de corte e taxas de avanço.

Saikiran e kumar (2019) pesquisaram os efeitos do uso de um fluido de corte a base de óleo de amendoim na usinagem de ligas de cobre. Nesse caso foram avaliados a intensidade da força de corte, a taxa de remoção do material e o acabamento superficial. Os experimentos foram realizados em três diferentes tipos de ligas de cobre, usando ferramentas de aço-rápido e duas formulações de fluido de corte. Os autores concluíram que o uso desse fluido vegetal maximizou a taxa de remoção de material e minimizou a rugosidade da superfície.

Sarikaya e Güllü (2015), investigaram a rugosidade da superfície e o desgaste da ferramenta no torneamento de um material endurecido, Haynes 25, usando as abordagens de mínima quantidade e de inundação com um fluido de corte vegetal. Os resultados mostraram que a abordagem de mínima quantidade de fluido de corte foi muito mais eficiente do que a por inundação e que o fluido de corte vegetal é mais apropriado que o convencional devido às vantagens de melhorar as questões ambientais, reduzir a tendência de desgaste da ferramenta de corte e melhorar a qualidade da superfície usinada.

Neves (2013) estudou a influência da aplicação de óleos vegetais comestíveis como fluido de corte no processo de furação do aço ABNT 1045. Foram utilizados os óleos de girassol, canola, soja, milho e babaçu como base para formulação dos fluidos que foram aplicados por MQL e comparados a um óleo sintético aplicado por jorro, à usinagem a seco e à usinagem com um óleo comercial também aplicado por MQL. Foram avaliadas a vida da ferramenta, o torque e a força de usinagem em diferentes condições de corte. Como resultados foi possível identificar que o melhor desempenho foi o do óleo de canola quando usados menores avanços e, por fim, o de girassol ao utilizar avanços maiores.

Araújo Junior (2013) também investigou o desempenho dos óleos vegetais comestíveis aplicados por MQL. Sua análise teve como foco o fresamento frontal do aço ABNT 1045. Para a produção dos fluidos de corte foram utilizados como insumos os óleos de algodão, canola, girassol, babaçu, soja e milho. Dessa maneira, este estudo buscou comparar os fluidos biodegradáveis ao fluido sintético e à usinagem a seco pelas técnicas MQL e jorro, tendo como variáveis de saída a força e a potência de usinagem, a vibração do sistema e o acabamento superficial da peça. Os óleos a base de algodão e canola permitiram a obtenção dos melhores resultados e, para comprovar sua efetividade, o autor avaliou a vida da ferramenta em função do volume de material removido, tendo sido identificado que os mesmos óleos apresentaram um bom desempenho nas condições de baixas e altas velocidades de corte.

Fernandes (2019) desenvolveu uma pesquisa que avaliou, em termos de aspectos técnicos e econômicos, a viabilidade da utilização de nitrogênio líquido (LN₂) como fluido de corte no torneamento do aço ferramenta AISI D6 temperado e revenido, comparando seus resultados aos de uma emulsão de óleo mineral usada por jorro e à usinagem a seco. Neste estudo foram avaliados o desgaste da ferramenta, a morfologia dos cavacos, e posteriormente foi estruturada uma análise econômica. A partir disso, identificou-se que a técnica a seco se mostrou mais viável que qualquer outra condição, porém, segundo o autor, a usinagem com LN₂ pode ser justificada pelos seus benefícios técnicos, tais como redução da rugosidade, aumento da dureza média e das tensões residuais compressivas, bem como seu uso como fluido não poluente.

Araújo Junior *et al.* (2017) estudaram em sua pesquisa a lubrificação e o comportamento tribológico dos óleos vegetais a base de canola, noz de babaçu, soja, girassol, algodão e milho durante a usinagem do aço AISI 1045 focando na fabricação sustentável. A partir disso, ao testar a capacidade de resfriamento e a influência na vida da ferramenta, os autores identificaram que os óleos a base de algodão e canola possibilitaram os melhores resultados, além de não serem tóxicos para os seres humanos e não agredirem ao meio ambiente. Finalmente, concluiu-se que a adesão ou atrito foi o mecanismo de desgaste dominante encontrado, independente do óleo testado.

França (2018) desenvolveu e caracterizou 32 emulsões a base de óleo de babaçu e mamona para aplicação como fluidos de corte em usinagem por meio da análise de espectroscopia de infravermelho, viscosidade, molhabilidade, pH, calorimetria exploratória diferencial e análise termogravimétrica. Em seu estudo foram encontrados resultados

satisfatórios em relação às propriedades avaliadas, identificando o grande potencial para aplicação na usinagem.

3 METODOLOGIA

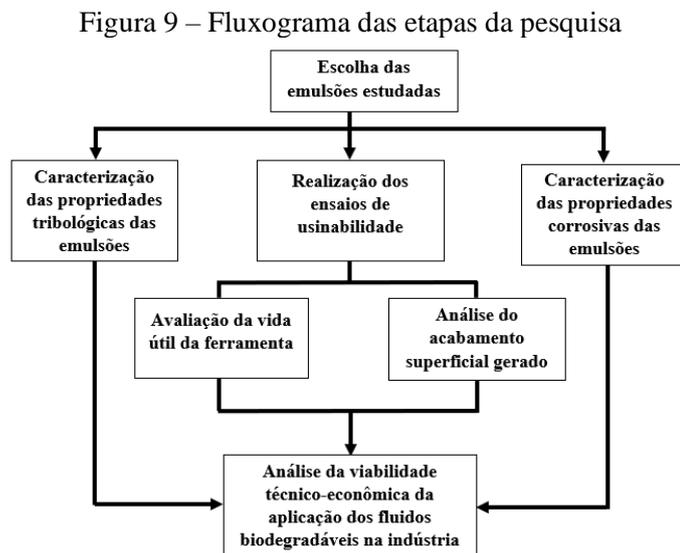
Essa seção apresenta a caracterização da pesquisa, juntamente aos materiais e métodos utilizados no desenvolvimento do trabalho.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA

Do ponto de vista de sua natureza esta pesquisa é considerada como aplicada, pois objetiva gerar conhecimentos para aplicação prática e dirigidos à solução de problemas específicos. Complementarmente, pode ser caracterizada como quantitativa por traduzir opiniões e informações em números visando classificá-los e analisa-los (SILVA; MENEZES, 2005). Contudo, com relação aos seus objetivos, o estudo em questão classifica-se como exploratório e experimental, visto que busca desenvolver, esclarecer e modificar conceitos e ideias visando formular problemas mais precisos ou hipóteses pesquisáveis para estudos posteriores, por meio de um estudo relacionado à análise de fenômenos (GIL, 2008).

3.2 MATERIAIS E MÉTODOS

O planejamento das atividades e procedimentos é importante para a obtenção de sucesso em uma pesquisa experimental, visto que a partir desta premissa pode-se deter maior controle sob seus resultados. Desse modo, a Figura 9 apresenta uma sequência estruturada das etapas realizadas no desenvolvimento deste trabalho.



Fonte: Autoria própria (2021).

Observa-se na Figura 9 que a primeira etapa foi a escolha das emulsões, objetivando uma avaliação preliminar para determinar as melhores amostras do ponto de vista técnico-econômico. De maneira complementar a essa etapa, foram caracterizadas as propriedades corrosivas e tribológicas de cada emulsão selecionada, com o intuito de verificar a capacidade de proteção contra a corrosão e sua influência no atrito e desgaste.

Simultaneamente, foram realizados os ensaios de usinabilidade e, paralelamente a isso, as análises de vida útil da ferramenta e acabamento superficial das peças usinadas, para cada condição estudada. Por fim, a partir dos dados relativos ao desempenho dos fluidos, foi possível realizar uma análise de viabilidade técnico-econômica, gerando assim resultados concretos para a indústria.

3.2.1 Escolha das emulsões estudadas

França (2018) desenvolveu 32 emulsões a base de óleo vegetal no Laboratório de Engenharia de Superfície e Desgaste (LESD) do Instituto Nacional de Tecnologia de União e Revestimento de Materiais (INTM/UFPE) em seu trabalho. Desse total foram pré-selecionadas apenas duas que apresentaram melhor desempenho técnico e econômico, levando em consideração aspectos como viscosidade, pH, molhabilidade, estabilidade térmica e percentual de óleo.

Sabendo que o objetivo deste estudo foi analisar a viabilidade técnico-econômica do uso de fluidos biodegradáveis, utilizou-se uma emulsão a base de fluido sintético como referência. Nesse sentido, foi realizada uma análise baseada em três emulsões, sendo elas a base de óleo de babaçu, mamona e fluido comercial sintético. Cada uma dessas formulações apresenta suas próprias características e peculiaridades, contudo para efeito de comparação econômica, apresentam o mesmo percentual de óleo em sua composição. A Tabela 2 evidencia a composição das emulsões que apresentaram melhor desempenho no estudo de França (2018) e que foram selecionadas para este estudo.

Tabela 2 – Composições das emulsões a base de óleo vegetal (100 ml)

Emulsão	Óleo vegetal (ml)	Tensoativo (ml)	Teor de água (ml)
BAB-05-05	5	5	90
MAM-05-02	5	2	93

Fonte: Autoria própria (2021).

Como observado na Tabela 2, a primeira emulsão chamada de “BAB-05-05” necessita de 5 ml de óleo de babaçu, 5 ml de tensoativo e 90 ml de água destilada para formular 100 ml de fluido. Complementarmente, a segunda amostra, nomeada como “MAM-05-02” é composta por 5 ml de óleo de mamona, 2 ml de tensoativo e 93 ml de água destilada.

As emulsões foram escolhidas por meio de análises e testes preliminares relacionados às propriedades físico-químicas anteriormente citadas, que são fundamentais para um fluido de corte. Além disto, por sua composição apresentar pequena quantidade de óleo vegetal e agentes emulsificantes, seu custo também é reduzido, tornando esta característica um atrativo econômico. Sendo assim, como maneira de gerar comparações também foi desenvolvida uma emulsão a base de óleo sintético, a composição desta emulsão pode ser observada na Tabela 3.

Tabela 3 - Composição da emulsão a base de óleo sintético (100 ml)

Emulsão	Óleo (ml)	Água destilada (ml)
SINT-05-95	5	95

Fonte: Autoria própria (2021).

Percebe-se que a emulsão SINT-05-95 não necessita de incremento de nenhum agente emulsificante e apresenta o mesmo teor de óleo que as emulsões anteriores. Desse modo, para o desenvolvimento deste fluido foram usados 5 ml do óleo sintético *Blasocut* BC 40 NF e 95 ml de água destilada. O óleo utilizado nesta emulsão foi escolhido devido à sua larga utilização como fluido de corte para processos de usinagem nos dias de hoje.

3.2.2 Caracterização das propriedades tribológicas das emulsões

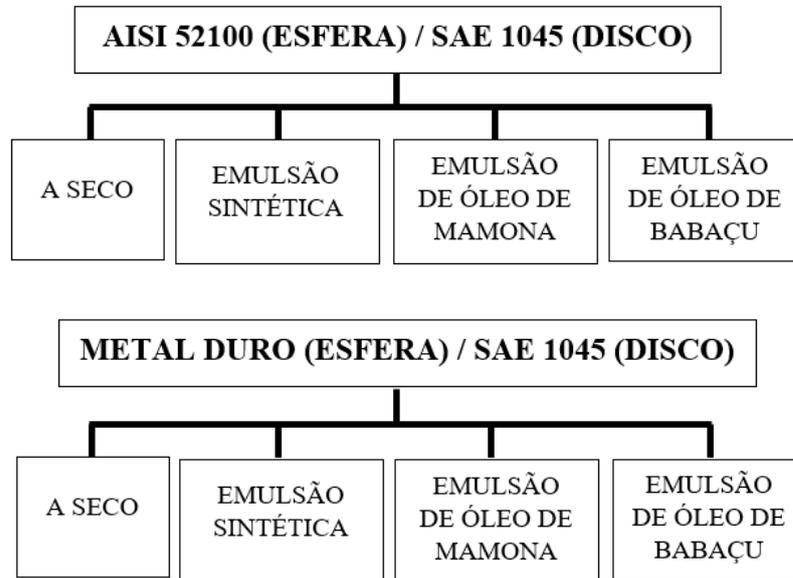
O levantamento das propriedades tribológicas das emulsões foi desenvolvido por meio de ensaios de configuração pino-disco nas condições a seco e em meio fluido, utilizando as 3 emulsões estudadas. Os ensaios foram realizados com base na norma ASTM G99 (2017), que apresenta de maneira direta o método padrão para teste de desgaste com um aparelho pino-disco. O esquema do procedimento está ilustrado na Figura 8, presente na seção 2.4 deste trabalho.

3.2.2.1 Metodologia dos ensaios

Os aspectos tribológicos analisados foram o coeficiente de atrito gerado pelo par pino-disco em cada condição e o desgaste ocasionado no disco após este ensaio. Sendo assim, foi

realizado um planejamento experimental abrangendo 8 ensaios, que representam todas as condições possíveis. Adicionalmente, cada ensaio foi realizado 3 vezes para garantir a confiabilidade dos dados obtidos. A Figura 10 apresenta um fluxograma de todas as combinações estudadas.

Figura 10 – Planejamento experimental dos ensaios realizados



Fonte: Autoria própria (2021).

Para este experimento foram utilizados como parâmetros básicos uma carga de 20 N, uma velocidade linear de 0,1 m/s e 4.000 ciclos como padrão para o término da análise. Apenas a velocidade linear foi determinada a partir da norma ASTM G99 (2017), os demais valores foram definidos a partir de testes preliminares. Além disso, todos os ensaios seguiram esses parâmetros, visando a comparação de seus resultados.

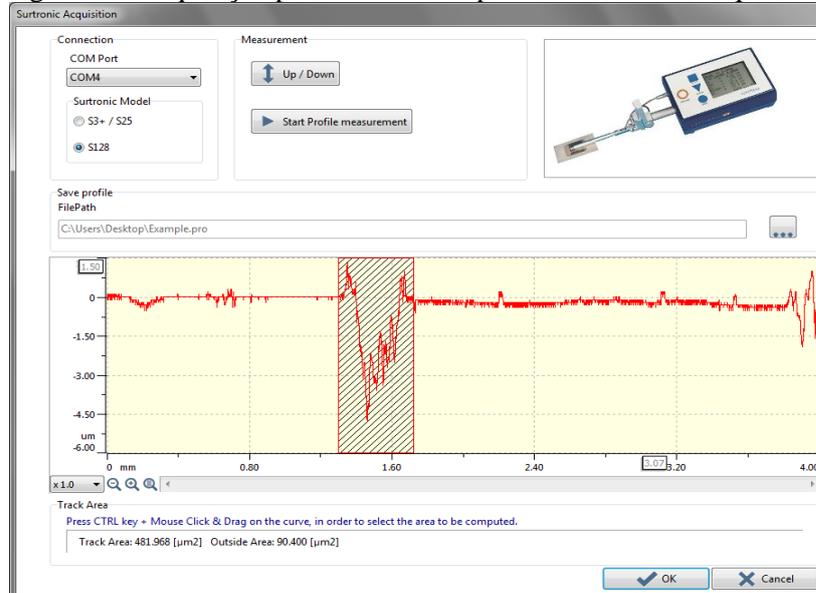
Durante o ensaio, foram levantadas as curvas de coeficiente de atrito por meio do *software* Tribometer desenvolvido pela Anton Paar. Este *software* coleta os dados no momento da execução do ensaio e compila todas as informações geradas em um relatório. A Figura 11 ilustra a tela do processo de aquisição de dados do *Software* utilizado neste experimento.

Figura 11 – Tela inicial do Software Tribometer



Fonte: Autoria própria (2021).

Após cada ensaio, foi medido o desgaste no disco por meio do rugosímetro de superfície S-Series e do complemento *Surtronic Aquisition* disponível no *Software Tribometer*. A partir dessa aplicação foi possível selecionar manualmente as variações na topologia da superfície, sendo assim, a área encontrada na análise foi utilizada para determinar o volume de material removido por meio de cálculos do próprio *software*. A Figura 12 apresenta a topologia de um disco usado no experimento.

Figura 12 – Aquisição por meio do complemento *Surtronic Aquisition*

Fonte: Autoria própria (2021).

3.2.2.2 Preparação das amostras

De acordo com a norma ASTM G99 (2017) é recomendável que o pino apresente formato esférico ou cilíndrico, com diâmetro entre 2 e 10 mm e um acabamento superficial de $0,01 \mu\text{m}$. Portanto, neste trabalho foram utilizadas esferas de rolamento de 6 mm de diâmetro como pino, compostas de AISI 52100 e metal duro. Foi dispensada a preparação das esferas, pois o acabamento superficial especificado pelo fabricante foi de $0,008 \mu\text{m}$. Sendo assim, as esferas foram presas em um suporte, que serviu de apoio, como um pino, conforme ilustrado na Figura 13.

Figura 13 – Suporte para as esferas de rolamento

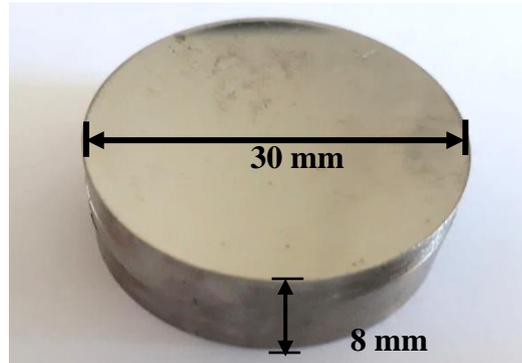


Fonte: Anton Paar (2021).

Os corpos de prova usados como discos para os ensaios foram do aço SAE 1045, obtidos por meio de uma operação de sangramento e posterior faceamento, visando obter uma superfície plana. Com relação às dimensões e preparação da superfície, a norma ASTM G99 (2017) afirma que o disco deve ter um diâmetro entre 30 e 100 mm, além de uma espessura de 2 a 10 mm, e uma rugosidade superficial de $0,8 \mu\text{m}$.

Sendo assim, foram usinados 4 discos (utilizou-se um lado por ensaio) de maneira a obter um diâmetro de 30 mm e espessura de 8 mm. De maneira complementar, as amostras foram preparadas metalograficamente por meio de lixas #120, #220, #400, #800, #1200 e polidas em pasta de diamante de $3 \mu\text{m}$, apresentando um acabamento superficial final de $0,26 \mu\text{m}$, medido no rugosímetro de superfície S-Series. As dimensões dos discos usados nos ensaios são apresentadas na Figura 14.

Figura 14 – Dimensões dos discos usados nos ensaios de configuração pino-disco



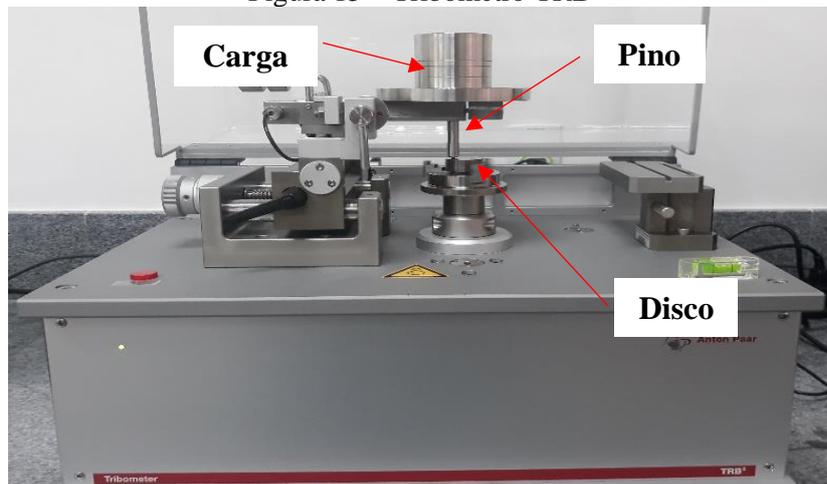
Fonte: Autoria própria (2021).

Além da preparação metalográfica, antes de cada ensaio as esferas e os discos foram submetidos a um processo de limpeza para evitar a contaminação dos fluidos durante o processo. Sendo assim, todos os dois componentes passaram 5 minutos imersos em um béquer com acetona. Após isto, mais 5 minutos em um béquer com álcool isopropílico. Todas as duas operações foram realizadas em um aparelho de ultrassom.

3.2.2.3 Equipamento utilizado

Para a realização dos experimentos foi utilizado o Tribômetro TRB³ desenvolvido pela Anton Paar. O equipamento é um sistema instrumentado automático que permite um método rápido e confiável de caracterização de várias superfícies, bem como o estudo da influência do uso de fluidos na lubrificação destas. A Figura 15 apresenta o tribômetro utilizado nesta pesquisa.

Figura 15 – Tribômetro TRB³

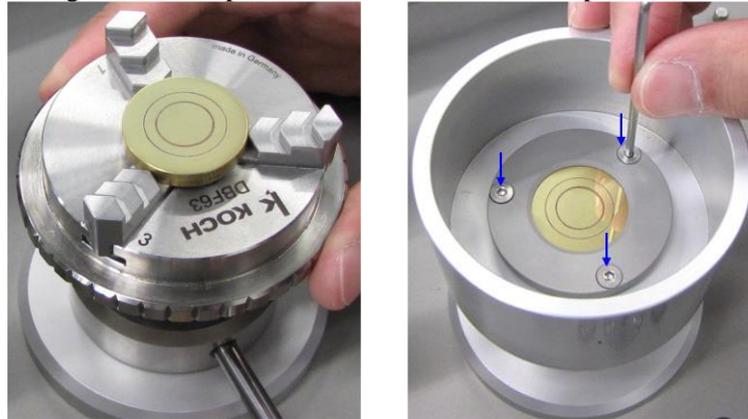


Fonte: Autoria própria (2021).

A partir da Figura 15 percebe-se como funciona a fixação dos elementos (pino, disco e carga) no sistema em análise. Dessa maneira, utilizando Tribometro TRB³, juntamente com o *software* Tribometer, foi possível caracterizar e comparar a influência dos fluidos de corte no coeficiente de atrito do par e no desgaste gerado no disco.

Para a realização dos testes a seco e em meio fluido foram utilizados os dois dispositivos mostrados na Figura 16. É importante salientar que o dispositivo usado para testes em meio fluido foi limpo da mesma maneira que as esferas e discos, visando evitar contaminações.

Figura 16 – Dispositivos usados nos testes de pino-disco



Dispositivo usado nos testes a seco

Dispositivo usado nos testes em meio fluido

Fonte: Anton Paar (2021).

3.2.3 Caracterização das propriedades corrosivas das emulsões

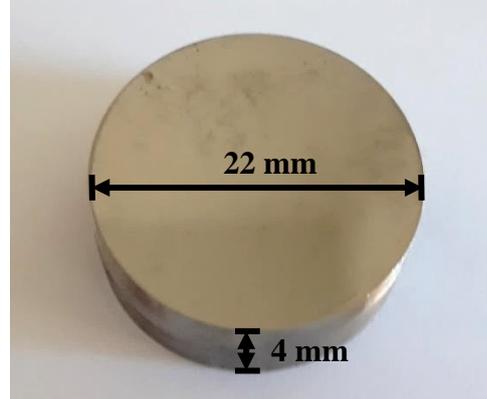
Com relação à caracterização das propriedades corrosivas, foram realizados os ensaios de potencial de circuito aberto, impedância eletroquímica e polarização linear em cada uma das emulsões. Vale ressaltar que para os dois primeiros ensaios descritos foram estudados também como formulações padrão os fluidos de NaCl (3,5%) e água destilada. Além disso, com o intuito de obter confiabilidade dos dados, cada experimento foi realizado 3 vezes.

3.2.3.1 Preparação das amostras

As amostras utilizadas para os ensaios de corrosividade foram de aço SAE 1045 e passaram pela mesma preparação metalográfica e de limpeza aplicada nos ensaios

tribológicos desta pesquisa. A Figura 17 apresenta uma representação das amostras metálicas usadas no experimento.

Figura 17 – Dimensões dos discos usados nos ensaios eletroquímicos



Fonte: Autoria própria (2021).

3.2.3.2 Equipamento utilizado

No desenvolvimento do estudo do potencial de circuito aberto, impedância e polarização foi utilizado um potenciostato AUTOLAB PGSTAT 302 N, juntamente com a interface NOVA 2.4.1. Esse equipamento é apresentado na Figura 18.

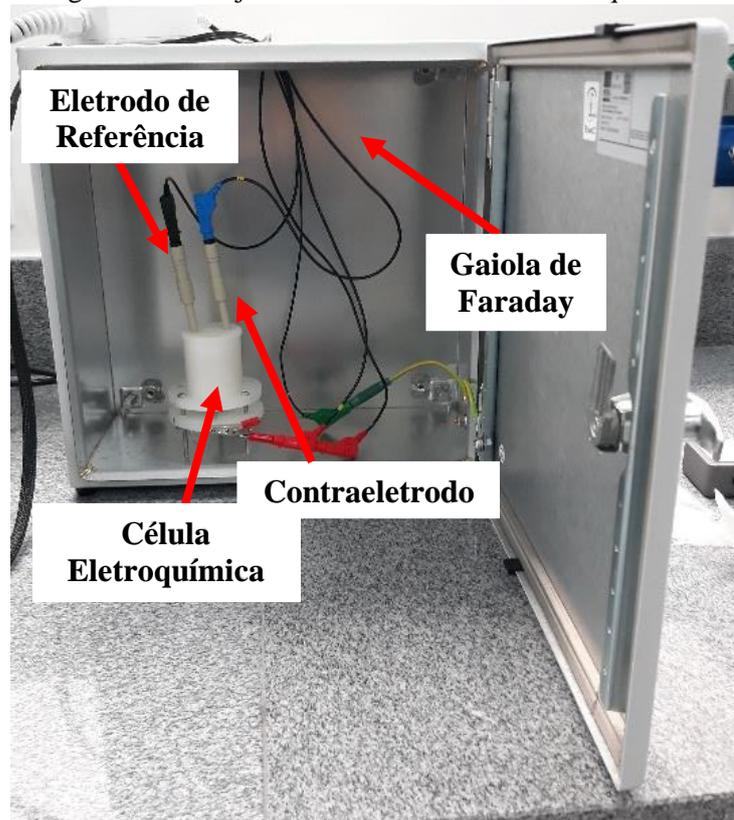
Figura 18 – Potenciostato AUTOLAB PGSTAT 302 N



Fonte: Metrohm (2021).

Além do equipamento citado anteriormente utilizou-se uma Gaiola de Faraday, uma célula contendo o fluido e a amostra metálica estudada, um eletrodo de referência (pseudoeletrodo) e um contra-eletrodo, ambos de platina. A Figura 19 apresenta o conjunto.

Figura 19 – Conjunto utilizado nos testes eletroquímicos



Fonte: Autoria própria (2021).

3.2.3.3 Ensaio eletroquímicos

Para a determinação de parâmetros dos ensaios eletroquímicos foram realizados testes preliminares, tendo em vista que é incipiente a bibliografia relacionada a aplicação desses experimentos em fluidos de corte. A partir disso, no estudo de Potencial de Circuito Aberto (OCP) foi estabelecido um tempo de 15 minutos de duração para cada ensaio. Em linhas gerais, a análise feita nesse ensaio é que quanto maior for o potencial gerado, menor será a espontaneidade termodinâmica do processo corrosivo acontecer.

Além disso, com relação ao ensaio de impedância eletroquímica foi usada uma faixa de frequência de 10^5 a 10^{-2} Hz como padrão. Nesse sentido, a análise foi feita a partir de um gráfico *Nyquist*, que apresenta a comparação entre arcos capacitivos de cada composto. Dessa forma, quanto maior for o arco capacitivo, menor será a densidade de corrente e, conseqüentemente, será gerada uma reação eletroquímica mais lenta. Tal experimento ajuda a entender inicialmente o comportamento cinético da relação de corrosão.

De maneira complementar, para o experimento de polarização linear foi determinado um potencial de polarização de 0,5 V a partir do potencial encontrado de OCP, a uma velocidade de varredura de 0,001 V/s. A partir dessa análise pôde-se avaliar que as emulsões

que apresentassem maior corrente de corrosão ao longo do ensaio teriam maior cinética no processo corrosivo.

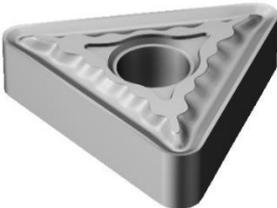
3.2.4 Ensaios de usinabilidade

Nesse tópico é apresentado o planejamento prévio dos experimentos que foram realizados, desde a determinação dos parâmetros a serem utilizados nos testes de usinagem até o processo de medição e coleta de dados de cada ensaio.

3.2.4.1 Determinação dos parâmetros dos testes de usinagem

Um planejamento prévio dos materiais, ferramentas e condições de corte é o ponto inicial para a avaliação das características de um ensaio de usinagem. Assim, as ferramentas utilizadas foram pastilhas intercambiáveis triangulares da Sandvik código TNMG 16 04 04 - QM H13A sem revestimento. A escolha da pastilha foi condicionada à sua adequação a usinagem classe P (Aços de baixa-liga) e por não apresentar revestimento, resultando em um tempo de usinagem adequado, calculado a partir do simulador da fabricante e utilizando os parâmetros dos ensaios de usinagem. As informações importantes referentes às pastilhas são apresentadas na Figura 20.

Figura 20 – Informações importantes da pastilha TNMG 16 04 04 - QM H13A

	CARATERÍSTICAS	
	Classificação de materiais: P, M, K e S	
	Número de arestas de corte: 6	
	Raio de ponta: 0,397 mm	
	Espessura da pastilha: 4,763 mm	
	Peso do item: 0,007 kg	
	Comprimento efetivo da aresta de corte: 16,098 mm	
	Classe: H13A	
	Ângulo de folga principal: 0°	

Fonte: Sandvik Coromant (2021).

O suporte utilizado para fixar as pastilhas intercambiáveis foi o MTJNL-2020K-16M1 fabricado e comercializado pela Sandvik. Este modelo apresenta um ângulo de saída de -3° , fazendo com que o ângulo de folga da ferramenta seja de 3° .

A partir das informações apresentadas anteriormente, definiu-se que seriam utilizadas 3 (três) velocidades de corte, com avanço e profundidade de corte constantes. Tais parâmetros

foram dimensionados por meio da norma ISO 3685 (2017) baseados no raio de curvatura da ferramenta utilizada. Sendo assim, a referida norma estabelece 4 condições de corte para o ensaio de usinabilidade quando apenas a velocidade de corte será a variável do ensaio. A Tabela 4 apresenta as condições estabelecidas pela norma.

Tabela 4 – Condições padronizadas de corte

Condições de corte	A	B	C	D
Avanço f , <i>mm/rev.</i>	0,1	0,25	0,4	0,63
Profundidade de corte, a_p	1,0	2,5	2,5	2,5
Raio de quina, r_ϵ , <i>mm</i>	0,4	0,8	0,8	1,2

Fonte: ISO 3685 (2017).

Nesse contexto, observando-se a Figura 20 e o código da ferramenta percebe-se que o raio de curvatura da pastilha se aproxima de 0,4 mm. Desse modo, baseando-se nos dados da Tabela 4, pode-se inferir que a condição de corte A seria a mais apropriada para os testes. Dessa maneira, os parâmetros fixos estabelecidos foram avanço (f) de 0,1 mm/rev e profundidade de corte (a_p) de 1,0 mm.

Ainda de acordo com a ISO 3685 (2017), a velocidade de corte deve ser escolhida de maneira que a vida da ferramenta seja ao menos 5 min para a usinagem de materiais comuns e de 2 min para materiais de alto valor financeiro. Portanto, para a escolha das velocidades de corte a referida norma sugere a utilização de uma tabela contendo uma série geométrica de números preferenciais, divididos por tipo de ferramentas, podendo-se aumentar ou diminuir essas velocidades multiplicando ou dividindo por seu termo específico respectivamente. A Tabela 5 apresenta a série geométrica de números preferenciais instituída pela norma ISO 3685.

Tabela 5 – Série geométrica de números preferenciais

Aço-rápido (R40)	Metal duro revestido (R20)	Cerâmica (R10)
1,00	1,00	1,00
1,06		
1,12	1,12	
1,18		
1,25	1,25	1,25
1,32		
1,40	1,40	
1,50		
1,60	1,60	1,60
1,70		
1,80	1,80	
1,90		
2,00	2,00	2,00

Fonte: ISO 3685 (2017).

A partir dos dados apresentados na Tabela 5, utilizou-se a velocidade de corte mínima de 50 m/min (estabelecida por meio de simulações no site do fabricante) como um padrão inicial para o cálculo. Dessa maneira foi possível encontrar os valores das três velocidades de corte (V_{c1} , V_{c2} e V_{c3}) utilizadas, sendo elas, respectivamente, 50, 70 e 90 m/min.

Partindo dos parâmetros de corte dimensionados anteriormente, pôde-se estruturar a quantidade de ensaios que foram realizados e suas características. Sendo assim a Tabela 6 apresenta as condições de cada ensaio realizado.

Tabela 6 – Características dos ensaios realizados

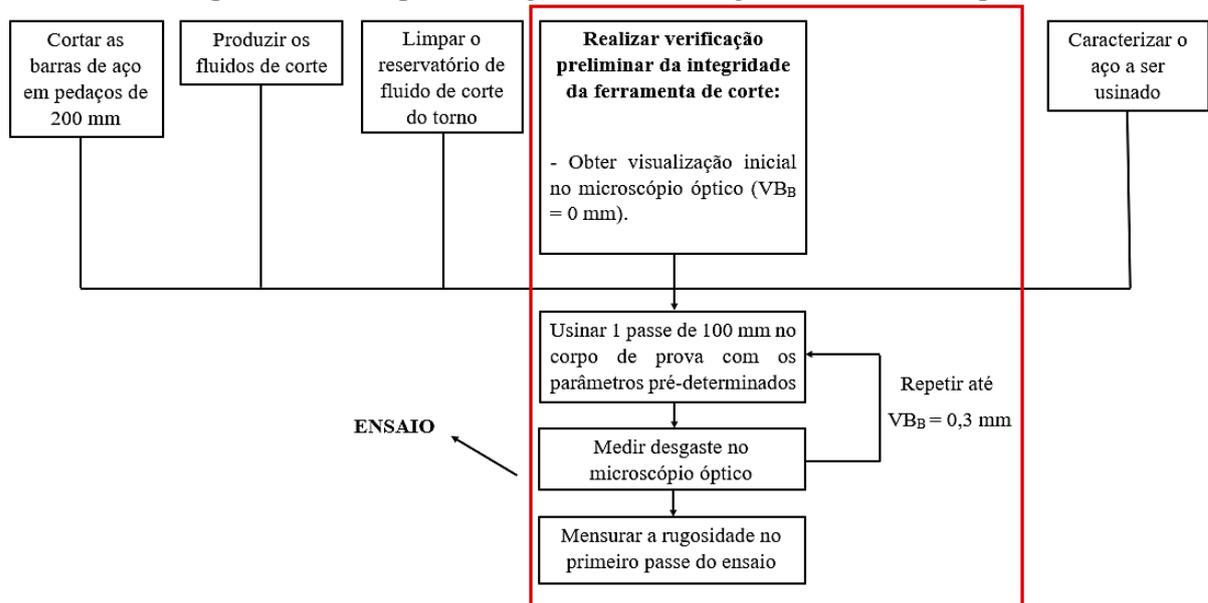
ENSAIO 1	ENSAIO 2	ENSAIO 3
CONDIÇÃO: A SECO $V_C = 90$ m/min $a_p = 1$ mm $f = 0,1$ mm/rev	CONDIÇÃO: A SECO $V_C = 70$ m/min $a_p = 1$ mm $f = 0,1$ mm/rev	CONDIÇÃO: A SECO $V_C = 50$ m/min $a_p = 1$ mm $f = 0,1$ mm/rev
ENSAIO 4	ENSAIO 5	ENSAIO 6
CONDIÇÃO: EMULSÃO DE ÓLEO SINTÉTICO $V_C = 90$ m/min $a_p = 1$ mm $f = 0,1$ mm/rev	CONDIÇÃO: EMULSÃO DE ÓLEO SINTÉTICO $V_C = 70$ m/min $a_p = 1$ mm $f = 0,1$ mm/rev	CONDIÇÃO: EMULSÃO DE ÓLEO SINTÉTICO $V_C = 50$ m/min $a_p = 1$ mm $f = 0,1$ mm/rev
ENSAIO 7	ENSAIO 8	ENSAIO 9
CONDIÇÃO: EMULSÃO DE ÓLEO DE MAMONA $V_C = 90$ m/min $a_p = 1$ mm $f = 0,1$ mm/rev	CONDIÇÃO: EMULSÃO DE ÓLEO DE MAMONA $V_C = 70$ m/min $a_p = 1$ mm $f = 0,1$ mm/rev	CONDIÇÃO: EMULSÃO DE ÓLEO DE MAMONA $V_C = 50$ m/min $a_p = 1$ mm $f = 0,1$ mm/rev
ENSAIO 10	ENSAIO 11	ENSAIO 12
CONDIÇÃO: EMULSÃO DE ÓLEO DE BABAÇU $V_C = 90$ m/min $a_p = 1$ mm $f = 0,1$ mm/rev	CONDIÇÃO: EMULSÃO DE ÓLEO DE BABAÇU $V_C = 70$ m/min $a_p = 1$ mm $f = 0,1$ mm/rev	CONDIÇÃO: EMULSÃO DE ÓLEO DE BABAÇU $V_C = 50$ m/min $a_p = 1$ mm $f = 0,1$ mm/rev

Fonte: Autoria própria (2021).

As operações de torneamento, como mostrado anteriormente, foram feitas em 3 velocidades de corte diferentes variando para cada uma delas o fluido de corte (emulsão de óleo de mamona, babaçu e sintético), além disso, também foi realizado um estudo relacionado à condição a seco. Nesse sentido, testaram-se 12 condições de corte distintas, como apresentado na Tabela 6. De maneira complementar, objetivando reprodutibilidade e representatividade estatística dos resultados, cada ensaio foi realizado 2 vezes.

Dessa maneira, foi fundamental determinar precisamente cada etapa do estudo com a finalidade de aprofundar o planejamento experimental para encontrar resultados próximos da realidade. Sendo assim, foi desenvolvido um fluxograma para os procedimentos experimentais, apresentado na Figura 21.

Figura 21 – Fluxograma dos procedimentos experimentais de usinagem



Fonte: Autoria própria (2021).

3.2.4.2 Material usinado

Para o desenvolvimento deste estudo foram utilizadas barras redondas do aço SAE 1045, com diâmetro de 50,8 mm e comprimento de 6 metros, fornecidas pela CM Produtos Siderúrgicos. Essas barras foram cortadas em pedaços de 200 mm de comprimento utilizando a serra de fita basculante modelo FM 3700 HM fabricada pela Fanho, e disponível na Plataforma de Usinagem e Fabricação do Instituto Nacional de Tecnologia de União e Revestimento de Materiais da UFPE. Antes de cada usinagem, foi retirada a camada de oxido da superfície de cada peça com uma ferramenta diferente da utilizada no ensaio.

De acordo com Silva *et al.* (2019), o SAE 1045 é classificado como um aço de médio carbono, que apresenta boa usinabilidade, boa resistência mecânica e alta forjabilidade. Além disso tem diversas aplicações, dentre elas, a fabricação de eixos, engrenagens comuns, componentes estruturais de máquinas, virabrequins entre outras. Para fins de conhecimento, a composição química do material fornecida pela empresa é apresentada na Tabela 7.

Tabela 7 – Composição química do aço SAE 1045

Elemento	%
C	0,46
Mn	0,64
Si	0,18
P	0,020
S	0,010

Fonte: CM Produtos Siderúrgicos (2021).

3.2.4.3 Caracterização do aço SAE 1045

Com a intenção de confirmar as informações do fornecedor a cerca do material usado nos ensaios desta pesquisa foi realizada sua caracterização. Sendo assim, nessa etapa foram realizadas avaliações de dureza, microdureza e microscopia óptica como medidas para a verificação da qualidade da matéria-prima utilizada.

Para o ensaio de dureza, cortou-se uma seção transversal de uma barra redonda do material, com 20 mm de diâmetro e 10 mm de espessura. De maneira complementar, preparou-se metalograficamente a amostra, utilizando-se as lixas de granulometria #120, #240, #400 e #600. Por fim, foi realizado o ensaio no durômetro HR400 da Mitutoyo, usando o bloco-padrão de dureza 92,5 HRBW.

Além dessa análise, também foi realizado um estudo da microdureza do material usando uma amostra das mesmas dimensões do ensaio de dureza, preparada metalograficamente por meio das lixas #120, #240, #400, #600, #800, #1200 e posteriormente polidas em pasta de diamante de 3 μ m. Após isso, foi obtida a microdureza por meio do microdurometro DS251515 da Emcotest.

A caracterização do material foi finalizada ao realizar a microscopia óptica do material em uma amostra de mesmas dimensões e preparação metalográfica usadas para a avaliação de microdureza, com posterior embutimento na embutidora Citopress-30 e ataque químico de Nital 2%. Posteriormente, a amostra foi analisada no microscópio óptico Axio Lab A1 acoplado a uma câmera digital AxioCam 105 Color, de maneira a ser revelada sua microestrutura. Todos os equipamentos utilizados na caracterização do aço SAE 1045 foram disponibilizados pelo INTM/UFPE.

3.2.4.4 Produção dos fluidos de corte e limpeza do reservatório de lubrificação/refrigeração do torno

Os fluidos de corte foram produzidos no Laboratório de Engenharia de Superfície e Desgaste (LESD/INTM/UFPE). Sendo assim, para sua produção utilizou-se um agitador magnético Q261 com aquecimento, alguns béqueres, óleos vegetais e sintéticos, além de água destilada. De acordo com França (2018) para a preparação das emulsões deve-se:

- Adicionar ao béquer a quantidade de óleo vegetal a ser utilizada e efetuar uma rápida pré-agitação com o objetivo de tirar o equipamento da inércia;
- Adicionar ao béquer já contendo o óleo vegetal, a quantidade de tensoativo a ser utilizada. Continuar com a pré-agitação;
- Adicionar ao béquer já contendo o óleo vegetal e o tensoativo, a quantidade de água destilada a ser utilizada. Prosseguir com a pré-agitação;
- Terminada a fase de pré-agitação, inicia-se o processo de agitação real de cada amostra, pelo intervalo de tempo de 20 minutos;
- Após o término da agitação, acondicionar as amostras em um frasco adequado, e identificar cada uma para análises posteriores.

Simultaneamente à produção dos fluidos realizou-se a limpeza do reservatório de lubrificação/refrigeração do torno convencional que foi utilizado para a usinagem dos corpos de prova. Esta limpeza foi realizada utilizando detergente neutro e água corrente no sentido de eliminar qualquer agente contaminante do reservatório antes da realização dos ensaios de usinagem.

3.2.4.5 Verificação preliminar da integridade da ferramenta de corte

Na avaliação preliminar foi verificada a integridade da ferramenta de corte obtida a partir de uma visualização inicial das arestas de corte de cada pastilha no microscópio estéreo Stemi 2000-C disponível no INTM/UFPE. A justificativa deste procedimento se deve à necessidade da verificação da existência micro-lascamentos na aresta de corte, que possam interferir nos resultados. A Figura 22 apresenta o equipamento utilizado na avaliação.

Figura 22 – Microscópio Estéreo Stemi 2000-C



Fonte: Autoria própria (2021).

3.2.4.6 Usinagem dos corpos de prova

A etapa de usinagem dos corpos de prova foi a parte que relativamente demandou mais tempo devido à necessidade de usinar os corpos de prova até que a aresta da ferramenta de corte atinja um desgaste de flanco (VB_B) de 0,3 mm. O processo de usinagem realizado foi o torneamento cilíndrico, tendo cada passe um comprimento de 100 mm, com os parâmetros de corte que foram apresentados anteriormente na seção 3.2.4.1 deste trabalho.

Para a realização da usinagem foi utilizado o torno convencional, modelo MS 205, fabricado pela Nardini. A máquina foi disponibilizada pela Plataforma de Usinagem e Fabricação (UsiFAB) do INTM/UFPE. A Figura 23 ilustra o torno utilizado para os ensaios de usinagem.

Figura 23 – Torno convencional utilizado nos experimentos



Fonte: UsiFAB INTM (2019).

O torno convencional apresentado na Figura 23 tem rotação que varia de 31,5 a 2.500 rpm dividida discretamente. Além disso, dispõe de avanços longitudinais de 0,021 a 0,5 mm/rot, avanços transversais de 0,042 a 1,013 mm/rot e potência máxima de 4 CV.

Devido a algumas limitações de valores de parâmetros possíveis no torno foi necessária a realização de uma análise pré-usinagem. Sendo assim, esta análise teve o objetivo de obter eficiência na utilização do material usinado e flexibilidade nas configurações possíveis no torno. A partir dessa premissa foi criada uma tabela com um conjunto de possibilidades de usinagem, fazendo com que a maioria dos passes realizados fossem produtivos para os resultados da pesquisa. Tendo em vista tais aspectos, se fez um par ordenado entre rotação e diâmetro da barra para estipular as velocidades de corte. A Tabela 8 apresenta este estudo.

Tabela 8 – Possíveis configurações de parâmetros no torno

		Rotação (rpm)								
		1250	1000	800	630	500	400	315		250
Diâmetros (mm)	49	192	154	123	97	77	62	48	38	Velocidades de corte (m/min)
	47	184	148	118	93	74	59	46	37	
	45	177	141	113	89	71	57	45	35	
	43	169	135	108	85	68	54	43	34	
	41	161	129	103	81	64	51	41	32	
	39	153	122	98	77	61	49	39	31	
	37	145	116	93	73	58	46	37	29	
	35	137	110	88	69	55	44	35	27	
	33	130	104	83	65	52	41	33	26	
	31	122	97	78	61	49	39	31	24	
	29	114	91	73	57	46	36	29	23	
	27	106	85	68	53	42	34	27	21	
	25	98	79	63	49	39	31	25	20	
	23	90	72	58	45	36	29	23	18	
	21	82	66	53	42	33	26	21	16	
	19	75	60	48	38	30	24	19	15	
17	67	53	43	34	27	21	17	13		
15	59	47	38	30	24	19	15	12		

ACEITÁVEL

NÃO ACEITÁVEL

Fonte: Autoria própria (2021).

Na Tabela 8 pode-se verificar que existem células na cor verde e vermelha. As primeiras sinalizam que estes parâmetros contemplam as características desejadas para algum dos ensaios, enquanto as vermelhas não se encaixam em nenhuma situação. Para definir a faixa de velocidade de corte aceitável para cada ensaio estipulou-se uma variação de no máximo 10% (95% a 105%) no valor esperado para o estudo.

Além disso, foi realizada a fixação entre pontas por meio de contra-ponta devido à razão diâmetro e comprimento do tarugo usinado, podendo gerar vibrações ou batimentos que afetam o acabamento superficial da peça e reduzem drasticamente a vida da ferramenta de corte. A Figura 24 mostra a peça montada no torno.

Figura 24 – Fixação da peça no torno



Fonte: Autoria própria (2021).

Durante o processo de usinagem também foi analisada a temperatura de corte visando explicar alguns fenômenos relacionados ao poder refrigerante dos fluidos testados, o que representa um aspecto importante para a vida da ferramenta. Para isso, utilizou-se o pirômetro PM6530C da Peakmeter.

Além disso, outra variável que foi controlada nas operações de torneamento foi a composição do fluido de corte, com o intuito de certificar que a formulação estava na proporção correta, tendo em vista a evaporação da água do reservatório. Para esse fim, utilizou-se uma inspeção diária por meio do refratômetro VX032SG fabricado pela Vodex.

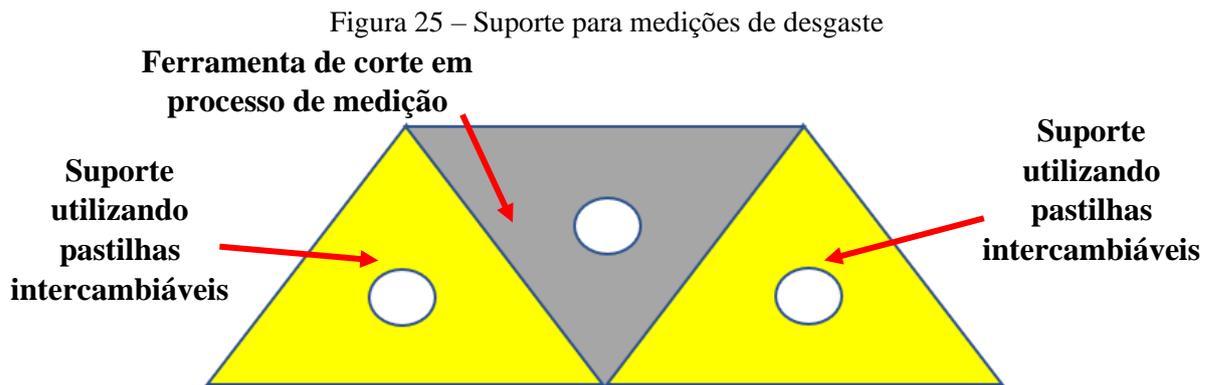
3.3.4.7 Medição do desgaste das ferramentas

Após cada passe na operação de torneamento era medido o desgaste de flanco (VB_B) de cada aresta da pastilha que foi utilizada na usinagem. Sendo assim, esse procedimento se repetiu até o VB_B alcançar o valor de 0,3 mm, considerado neste trabalho como critério de fim de vida da ferramenta.

Para esta avaliação foi utilizado novamente o microscópio estéreo Stemi 2000-C ilustrado na Figura 22, em conjunto com o *software* ZEN BLUE em sua versão 2.5. Nesse *software* é possível realizar medições a partir de escalas teóricas calibradas no próprio

dispositivo. Além disso, foi utilizada a função *grid*, que traça uma grade na visualização obtida, de maneira a evitar os desvios de medida devido ao desgaste da aresta de corte.

De um modo geral, a medição do desgaste foi um ponto fundamental para a criação da curva de vida das ferramentas, sendo este um dos principais resultados da pesquisa em questão. Logo, essa etapa foi tratada com o maior cuidado para evitar análises errôneas. Sendo assim, foi utilizado um suporte que reduzia problemas de inclinação, formado por pastilhas intercambiáveis dispostas na ilustração da Figura 25.



Fonte: Autoria própria (2021).

3.2.4.8 Mensuração da rugosidade

De maneira complementar à medição do desgaste também se fez necessária uma avaliação da rugosidade do perfil usinado, visando complementar os ensaios de usinabilidade. Sendo assim, foi definido como parâmetro de avaliação o R_a (Desvio aritmético médio da rugosidade), que foi medido no início vida da ferramenta, com a finalidade de analisar a influência de cada fluido no acabamento superficial da peça. O rugosímetro utilizado para a análise é apresentado na Figura 26.

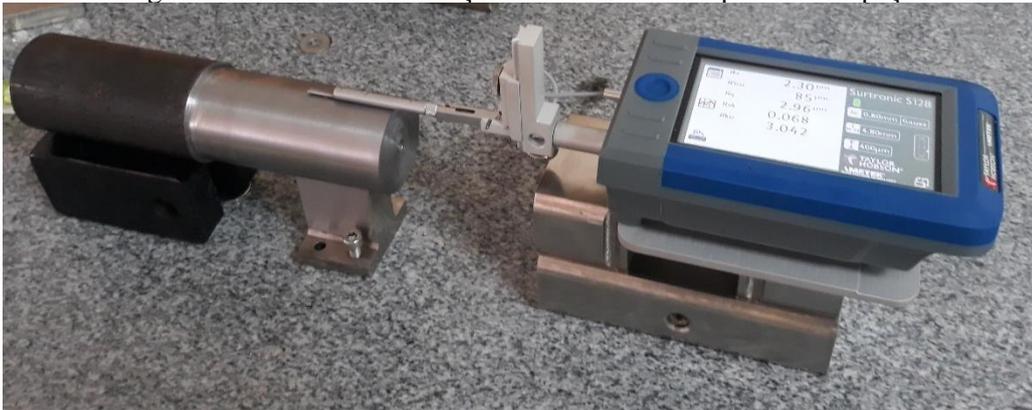
Figura 26 – Rugosímetro de superfície S-Series



Fonte: Taylor Hobson (2021).

O equipamento da Figura 26 foi disponibilizado pelo Laboratório de Materiais Compósitos e Integridade Estrutural (COMPOLAB) da UFPE. Devido a questões de mobilidade do equipamento foi necessária a desmontagem da peça no torno para posterior medição, contudo em cada medição realizada foi utilizado um nível de bolha para garantir o nivelamento do rugosímetro e da peça em processo de medição. A Figura 27 apresenta o sistema utilizado para a medição do acabamento superficial.

Figura 27 – Sistema de medição do acabamento superficial da peça



Fonte: Autoria própria (2021).

3.2.5 Análise de viabilidade econômica dos fluidos de corte biodegradáveis

Como foi apresentado no item 2.6 da revisão bibliográfica deste trabalho existem diversos custos relacionados a fluidos de corte em operações de usinagem, tornando uma análise de viabilidade econômica uma tarefa de alta complexidade. Sendo assim, devem ser feitas algumas considerações a fim de obter uma maior simplicidade no estudo.

Inicialmente, foi considerado que o único parâmetro técnico observado foi o tempo de usinagem até o desgaste de flanco da ferramenta de corte (VB_B) alcançar 0,3 mm. Sendo assim, realizou-se uma análise inicial referente ao custo com consumo de arestas de corte e energia no sistema de bombeamento de fluido do torno, bem como os custos de produção e descarte das emulsões. A partir disso, foram realizadas algumas considerações:

- O equipamento utilizado para aplicação do fluido de corte já estaria disponível, e apresentando o mesmo custo para todas as emulsões, se tornando negligenciável na análise econômica;
- O valor do kWh considerado foi de R\$ 0,60, por se encaixar na modalidade tarifária convencional (Baixa Tensão B3);

- O consumo de energia do motor que bombeia a emulsão foi feito pela equação: C_b (kWh/m) = P_m (KW) x 0,736 x T_c / η . Sendo C_b o consumo mensal de energia elétrica do motor, P_m a potência mecânica fornecida pelo motor, η o rendimento do motor e T_c (m) é tempo de corte por metro. Para o estudo em questão, $P_m = 90$ W e $\eta = 0,65$;
- No processo de usinagem a seco não foi considerado nenhum custo relativo ao sistema de bombeamento de fluido de corte;
- O preço de cada pastilha foi R\$ 54,76. Como cada uma apresenta 6 arestas, tem-se o valor de R\$ 9,13/aresta;
- O preço por litro considerados para os óleos de mamona, babaçu e sintético foram de R\$ 26,24, R\$ 33,50 e R\$ 68,00, respectivamente;
- O preço do litro do tensoativo utilizado nas emulsões de óleo vegetal foi de R\$ 85,00;
- Para diluir os fluidos emulsificáveis foi utilizada água destilada, cujo preço considerado foi de R\$ 3,13/litro;
- De acordo com Walker (2013) 22% do custo total do uso da técnica jorro é destinado para o descarte do fluido de corte. Sendo assim, deve ser adicionado mais 22% ao valor de aquisição da emulsão devido este descarte;
- Cada emulsão precisa ser agitada por 20 minutos, por meio do sistema lubrificação da máquina de usinagem para estar em condições de uso;
- O custo de mão-de-obra usado nos cálculos é relativo ao de um trabalhador de maquinário de usinagem na indústria, com salário mensal de R\$ 2.037,00;
- O reservatório de fluido do torno utilizado no trabalho tem capacidade de 12 litros.

Em um contexto geral, a análise de viabilidade econômica foi baseada no levantamento de custos por taxa de produção, levando em consideração a diluição dos custos fixos e o aumento dos custos variáveis de maneira proporcional. Além disto, foi realizada uma avaliação do custo por volume de produção que compara o ponto em que determinadas condições de corte são mais viáveis financeiramente que outras.

Sendo assim, inicialmente foram calculados os custos relacionados à produção dos fluidos de corte, onde o primeiro cálculo é em relação à operação de aferição (tempo manual) da mistura utilizada na formulação, expressa na Equação 1.

$$\text{Custo de aferição/L} = \text{Tempo padrão da operação} \times \text{Custo H/H} \quad (\text{Eq. 1})$$

Além da análise da atividade manual, existe a operação mista relacionada a agitação da emulsão até formar um fluido de fase única. Nesta etapa, tanto o colaborador quanto a máquina trabalham, sendo assim, a Equação 2 apresenta este cálculo.

$$\text{Custo de agitação/L} = \text{Tempo p. da operação} \times (\text{Custo H/H} + \text{Custo H/M}) \quad (\text{Eq. 2})$$

De maneira complementar também foram considerados os custos relativos aos insumos, ou seja, a matéria prima utilizada para a produção das emulsões, que pode ser consultada na Equação 3. Além disso, o custo total de produção é exposto na Equação 4.

$$\text{Custo de matéria-prima/L} = \sum \text{Consumo Bruto} \times \text{valor unitário do item} \quad (\text{Eq. 3})$$

$$\text{Custo de Produção} = \text{Custo de aferição} + \text{Custo de agitação} + \text{Custo de matéria-prima} \quad (\text{Eq. 4})$$

Outra análise econômica avaliada foi relacionada ao descarte dos fluidos, contudo considerou-se este custo atrelado apenas ao fluido sintético, pois este necessita de tratamento adequado antes de sua destinação final. Em linhas gerais, os fluidos biodegradáveis estudados nesta pesquisa não oferecem perigo ao meio ambiente e ao ser humano, podendo ser tratados como os óleos vegetais que utilizamos em casa, sem custo algum atrelado. Sendo assim, o cálculo relativo ao descarte da emulsão, leva em conta a consideração de Walker (2013) e adiciona ao custo do processo 22% do custo da emulsão devido sua destinação final.

Com relação ao processo de corte estipulou-se uma avaliação econômica relativa ao tempo de vida da ferramenta de corte, bem como o valor dispendido à utilização do sistema de bombeamento do fluido de corte. Nesse contexto, o cálculo relacionado ao desempenho da ferramenta é evidenciado pela Equação 5.

$$\text{Custo de ferramenta} = (n^\circ \text{ arestas utilizadas/metro usinado}) \times (\text{Custo da aresta}) \quad (\text{Eq. 5})$$

Ao final do cálculo também foi acrescentado o consumo de energia do motor que bombeia a emulsão, contudo considerando este custo como inexistente para a usinagem a seco. Dessa maneira, ao se juntar todos estes custos descritos anteriormente nas Equações 1, 2, 3, 4 e 5 foi possível determinar o custo por metro usinado para cada condição de corte. Além disso, o valor descrito anteriormente foi representado em real (R\$) e dólar americano (US\$), com a conversão de US\$ 1 = R\$ 5,04.

A análise final foi o levantamento de uma avaliação de custo por volume de produção de maneira a comparar os custos de cada condição e verificar quais as situações mais vantajosas do ponto de vista econômico. Sendo assim, a Equação 6 apresenta o cálculo para os custos de cada condição.

$$\begin{aligned}
 \text{Custo para cada condição} = & \text{Custo de produção e descarte das emulsões} + \\
 & ((\text{Custo de ferramenta de corte/m}) \times (\text{comp. usinado})) \\
 & + ((\text{Custo do sistema de bombeamento de fluido}) \times \\
 & (\text{comp. usinado})) \quad (\text{Eq. 6})
 \end{aligned}$$

Neste sentido, ao igualar os custos da condição A (Defensor) com a condição B (Desafiante), pode-se determinar o comprimento usinado para alcançar um ponto de equilíbrio entre os custos de duas emulsões. Dessa maneira, é possível determinar até qual comprimento de usinagem é economicamente viável a condição A e a partir de qual ponto a condição B apresenta maior vantagem financeira, tornando-se dessa maneira, uma avaliação imprescindível para esta pesquisa.

4 RESULTADOS

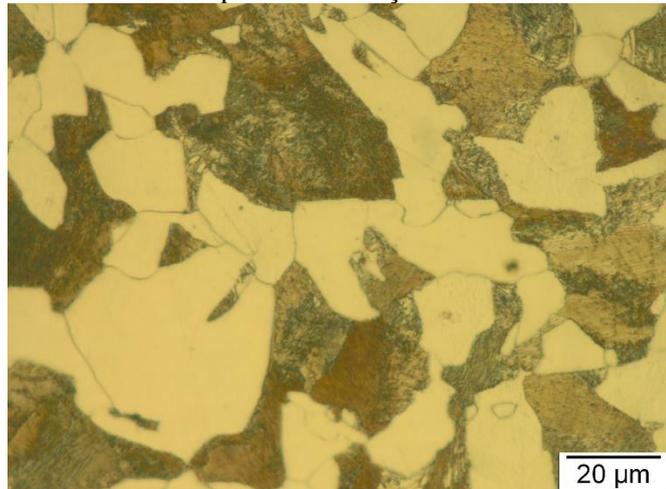
Nesse capítulo são apresentados os principais resultados encontrados na pesquisa, em conjunto com discussões geradas sobre o assunto.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO AÇO SAE 1045

O aço SAE 1045 foi utilizado em todos os estudos realizados nesta pesquisa, de maneira a ser um parâmetro fixo das análises, sendo assim, é necessário se ter conhecimento das propriedades mecânicas e metalúrgicas do material. Nesse sentido, foram levantadas a dureza, microdureza e microestrutura deste aço.

Dessa maneira, ao realizar os ensaios determinou-se os valores médios de dureza e microdureza do material, sendo eles respectivamente, $88,6 (\pm 0,64)$ HRB e $192,3 (\pm 9,01)$ HV. Além disso, também foram determinadas as microestruturas presentes no aço SAE 1045, percebendo-se a partir da Figura 28, a existência de uma estrutura ferrítica perlítica, onde a parte branca representa a ferrita e a parte escura a perlita (Ferro α + Carboneto de Ferro), confirmando a microestrutura do material adquirido do fabricante.

Figura 28 – Microestruturas presentes no aço SAE 1045 utilizado na pesquisa



Fonte: Autoria própria (2021).

4.2 CARACTERIZAÇÃO INFLUÊNCIA DAS EMULSÕES NAS PROPRIEDADES TRIBOLÓGICAS

Na caracterização das propriedades tribológicas foi analisado o comportamento do coeficiente de atrito e do desgaste gerado no disco no decorrer do ensaio de configuração pino-disco. Sendo assim, as próximas seções apresentam tais resultados.

4.2.1 Análise do coeficiente de atrito (μ_e)

A primeira característica tribológica avaliada foi o coeficiente de atrito gerado para as combinações entre metal duro e AISI 52100 (esferas), no SAE 1045 (disco) nas condições a seco, e com emulsões a base de fluido comercial sintético, óleo de babaçu e óleo de mamona. Para alcançar resultados mais conclusivos foi realizada uma análise estatística para determinação dos intervalos de confiança para a média populacional da variável aleatória estudada. No caso em questão, foi assumido que esta é uma distribuição normal por ter o desvio padrão conhecido. Sendo assim, a Tabela 9 apresenta os valores calculados para o intervalo de confiança (com 95% de confiança) da média populacional da variável aleatória *Coefficiente de atrito (μ_e)* obtida em cada condição dos ensaios de configuração pino-disco.

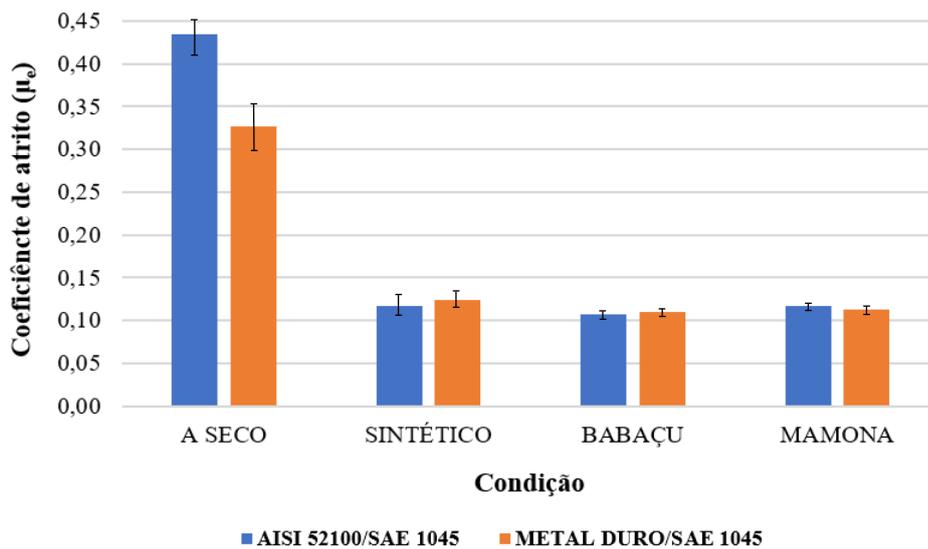
Tabela 9 – Intervalos de confiança para a variável aleatória *Coefficiente de atrito (μ_e)* para o para cada condição estudada

Condição do ensaio 		Seco	Sintético	Babaçu	Mamona	
Coeficiente de atrito médio (μ_e) (AISI 52100 / SAE 1045)	Média amostral (\bar{x})	0,4351	0,1173	0,1071	0,1176	
	Desvio padrão amostral (s)	0,0150	0,0070	0,0030	0,0030	
	Intervalo de confiança (95%) para a média populacional da variável <i>Coefficiente de atrito (μ_e)</i>	Limite superior	0,4518	0,1250	0,1102	0,1214
		Limite inferior	0,4184	0,1097	0,1040	0,1139
Coeficiente de atrito médio (μ_e) (METAL DURO / SAE 1045)	Média amostral (\bar{x})	0,3264	0,1245	0,1094	0,1134	
	Desvio padrão amostral (s)	0,0310	0,0040	0,0020	0,0010	
	Intervalo de confiança (95%) para a média populacional da variável <i>Coefficiente de atrito (μ_e)</i>	Limite superior	0,3612	0,1294	0,1121	0,1143
		Limite inferior	0,2916	0,1195	0,1067	0,1125

Fonte: Autoria própria (2021).

A partir da Tabela 9 é possível perceber que o coeficiente de atrito (μ_e) na condição a seco é muito maior que em meio fluido. De maneira complementar, comprova-se que a emulsão a base de óleo de babaçu apresenta o menor coeficiente de atrito em ambas as configurações de pino-disco. Além disto, na configuração com o par Metal Duro/SAE 1045, o fluido a base de mamona apresentou melhor desempenho que o sintético. A Figura 29 ilustra os resultados dos ensaios abordados.

Figura 29 – Gráfico comparativo do coeficiente de atrito em cada condição estudada



Fonte: Autoria própria (2021).

É perceptível ao analisar a Figura 29 que o desempenho das três emulsões estudadas é similar, com pequena vantagem para o fluido a base de óleo de babaçu, pois este apresenta melhores propriedades lubrificantes, ajudando a reduzir o atrito gerado entre as superfícies em contato. Sendo assim, este resultado levanta fortes indícios de que esta emulsão pode ser aplicada de maneira eficiente e eficaz em determinadas condições de usinagem. As curvas de comportamento do coeficiente de atrito (μ_e) dos ensaios de configuração pino-disco para cada uma das condições podem ser consultadas no APÊNDICE A deste trabalho.

4.2.2 Análise do desgaste no disco

Outra característica analisada nos ensaios tribológicos foi o desgaste gerado no disco após a operação. Sendo assim, foi medida a área desgastada no disco por meio do Rugosímetro de superfície S-Series, e posteriormente calculado o volume com base no comprimento da circunferência gerada, por meio do *software* Tribometer. A Tabela 10

apresenta os valores calculados para o intervalo de confiança (com 95% de confiança) da média populacional da variável aleatória *Desgaste no disco* obtida em cada condição dos ensaios.

Tabela 10 - Intervalos de confiança para a variável aleatória *Desgaste no disco* para cada condição do experimento de configuração pino-disco

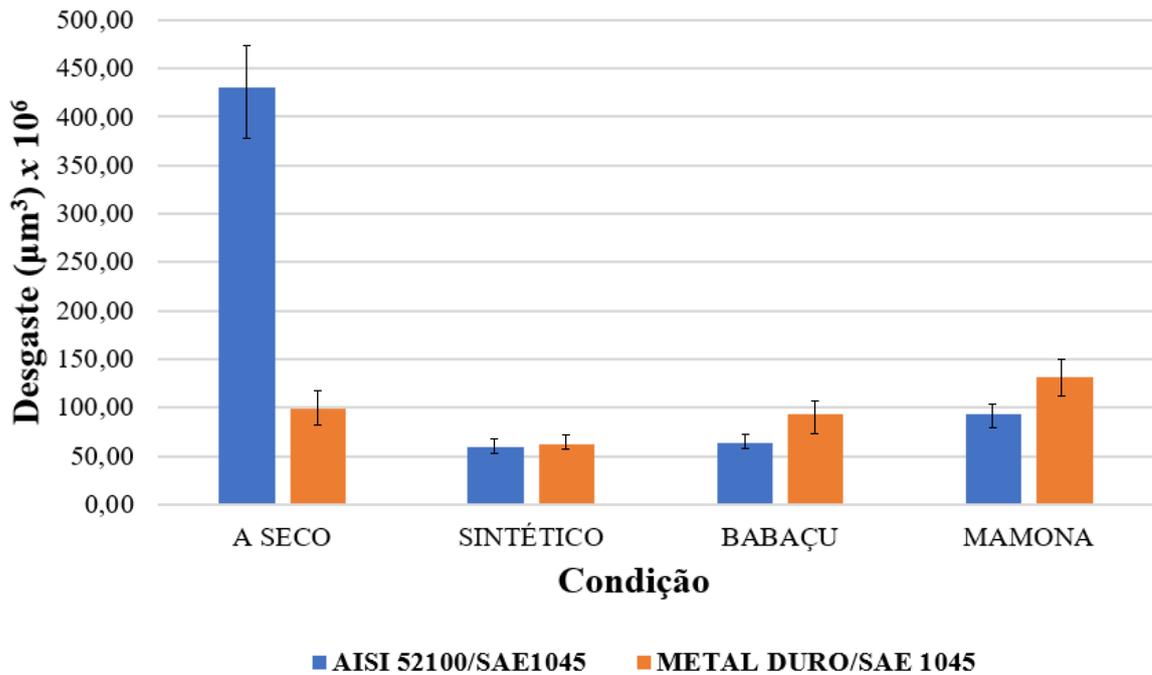
Condição do ensaio →		Seco	Sintético	Babaçu	Mamona	
Desgaste do disco para a configuração (AISI 52100 / SAE1045)	Média amostral (\bar{x}), μm^3	430×10^6	59×10^6	64×10^6	93×10^6	
	Desvio padrão amostral (s), μm^3	93×10^6	16×10^6	14×10^6	16×10^6	
	Intervalo de confiança (95%) para a média populacional da variável <i>Desgaste no disco</i>	Limite superior	474×10^6	67×10^6	58×10^6	101×10^6
		Limite inferior	387×10^6	52×10^6	70×10^6	86×10^6
Desgaste do disco para a configuração (METAL DURO / SAE1045)	Média amostral (\bar{x}), μm^3	99×10^6	62×10^6	93×10^6	131×10^6	
	Desvio padrão amostral (s), μm^3	24×10^6	15×10^6	34×10^6	43×10^6	
	Intervalo de confiança (95%) para a média populacional da variável <i>Desgaste no disco</i>	Limite superior	110×10^6	69×10^6	108×10^6	150×10^6
		Limite inferior	88×10^6	56×10^6	79×10^6	112×10^6

Fonte: Autoria própria (2021).

Observando a Tabela 10, pode-se inferir que, utilizando-se o par AISI 52100/SAE 1045 em meio fluido, obteve-se uma diminuição perceptível no desgaste gerado, sendo as emulsões a base de óleo comercial sintético e de babaçu, as que apresentaram melhor desempenho. Em contrapartida, ao analisar o comportamento de desgaste no par Metal duro/SAE 1045, percebe-se que a influência dos fluidos não foi tão grande, de maneira a constatar que apenas a emulsão sintética apresentou estabilidade nos dados para as duas condições.

Em um contexto geral, a utilização do fluido a base de óleo de babaçu apresentou melhores resultados que na configuração a seco em ambos os ensaios. Contudo, a emulsão a base de óleo de mamona não gerou resultados tão atraentes, principalmente ao avaliar o ensaio com o par Metal duro/SAE 1045. De maneira a ilustrar a análise, apresenta-se na Figura 30 um resumo do comportamento de desgaste para todas as condições estudadas.

Figura 30 – Comportamento do desgaste gerado no disco nos ensaios tribológicos



Fonte: Aatoria própria (2021).

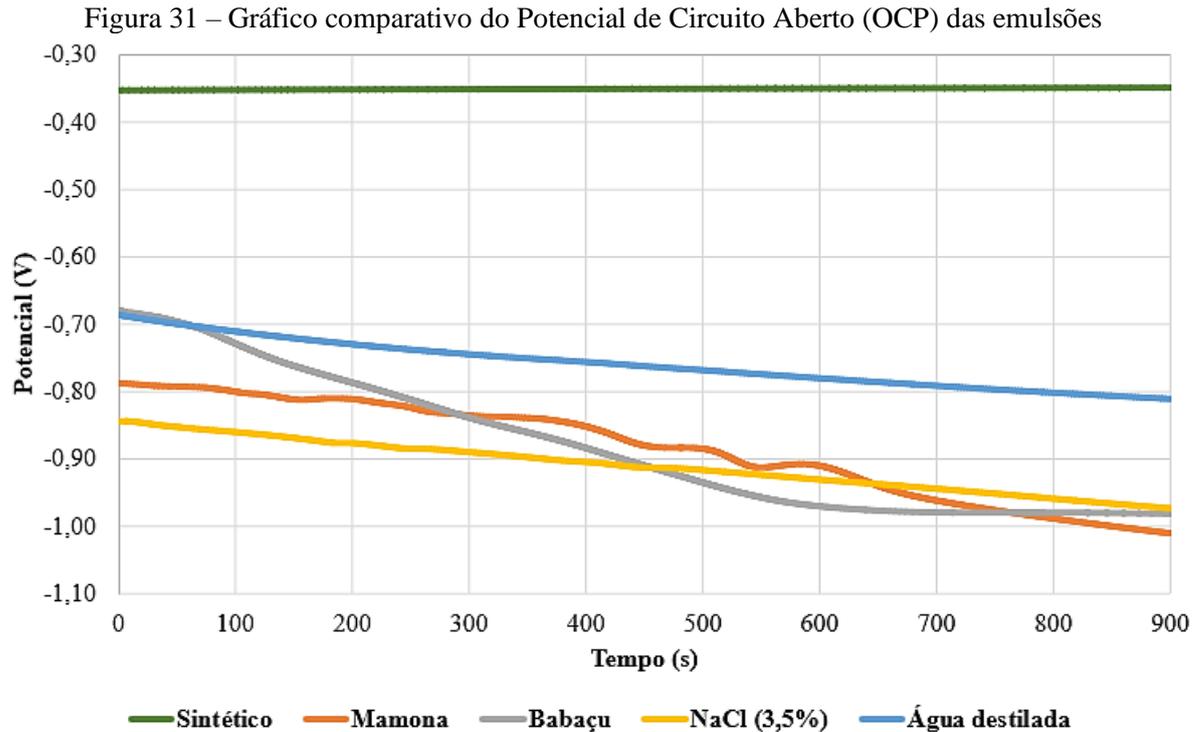
4.3 CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES CORROSIVAS DAS EMULSÕES

Na análise das propriedades corrosivas das emulsões foram realizados os ensaios de potencial de circuito aberto (OCP), impedância eletroquímica e polarização linear. Sendo assim, os resultados encontrados são apresentados nas próximas seções.

4.3.1 Análise de Potencial de Circuito Aberto (OCP)

O estudo das características corrosivas de cada fluido foi realizado de maneira comparativa utilizando os fluidos estudados neste trabalho, juntamente com composições de referência, como NaCl (3,5%) e água destilada, que são largamente utilizadas em ensaios eletroquímicos.

Na avaliação da corrosão deve-se avaliar os aspectos termodinâmicos e cinéticos. Levando em consideração o primeiro aspecto, o principal ensaio é o de Potencial de Circuito Aberto (OCP) que representa a espontaneidade termodinâmica do processo de corrosão ocorrer. Nesse sentido, a Figura 31 apresenta um gráfico comparativo do potencial gerado ao longo do tempo do experimento.



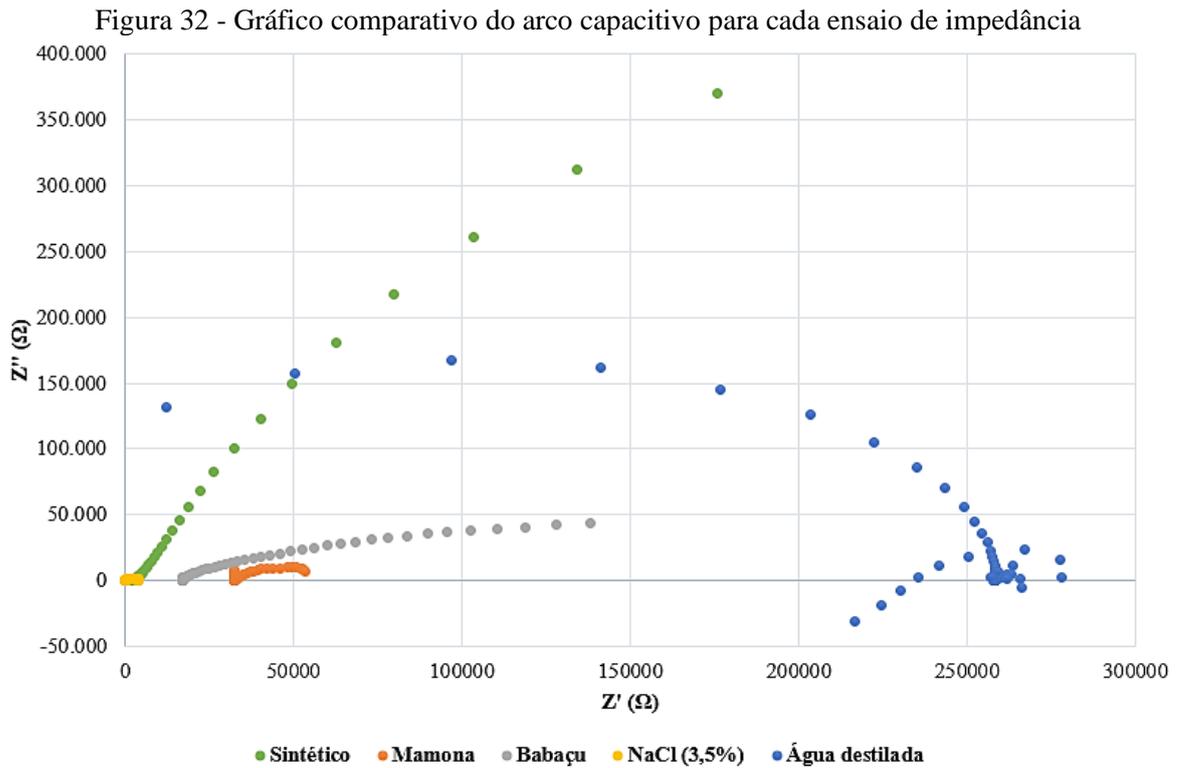
Como pode ser visto na Figura 31, o melhor desempenho foi apresentado pelo fluido sintético, pois este contém um inibidor de corrosão em sua formulação, de maneira a proporcionar um potencial menos negativo e estável com o passar do tempo. Os fluidos a base de óleo de mamona e babaçu, por sua vez, apresentaram maior espontaneidade termodinâmica para gerar corrosão que a água destilada, e proporcionaram um potencial mais negativo no decorrer do tempo do ensaio.

Além do que foi verificado anteriormente, é perceptível que na fase final do experimento, os fluidos biodegradáveis apresentaram potencial mais negativo até que o da solução de NaCl (3,5%). Este fenômeno ocorreu principalmente devido à instabilidade destes fluidos, contudo o problema descrito pode ser corrigido acrescentando-se um inibidor de corrosão ecologicamente correto em suas formulações.

Complementarmente à análise dos aspectos termodinâmicos relativos à corrosão, também foram realizados ensaios de impedância eletroquímica e polarização linear que apresentam uma avaliação em relação aos aspectos cinéticos do processo corrosivo, que serão abordados nos tópicos 4.3.2 e 4.3.3 desta pesquisa. Vale ressaltar, que o estudo da cinética é o ponto mais importante, pois apresenta o comportamento da velocidade da reação corrosiva.

4.3.2 Análise de Impedância Eletroquímica

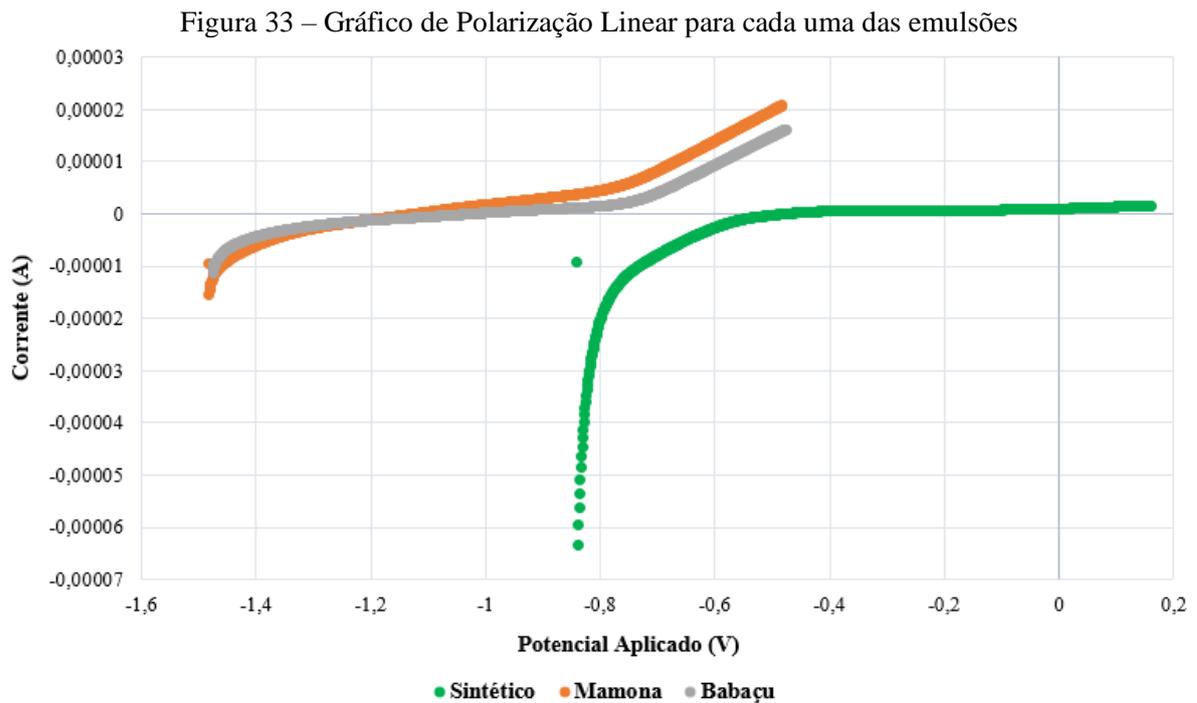
Outro fenômeno analisado foi o comportamento dos fluidos ao serem submetidos a um ensaio de impedância eletroquímica. Nesse caso também foram analisadas as cinco formulações estudadas no experimento de Potencial de Circuito Aberto. Sendo assim, a Figura 32 apresenta um gráfico comparativo chamado *Nyquist*, que representa o arco capacitivo gerado em cada ensaio de impedância.



A partir da Figura 32 é possível perceber novamente que o maior arco capacitivo é o do fluido comercial sintético, ou seja, este apresenta uma menor velocidade na reação de corrosão a partir desta avaliação. De maneira complementar, percebe-se que os arcos dos fluidos a base de óleo vegetal são menores que o da água destilada, contudo são maiores que o arco gerado pela solução de NaCl (3,5%). Além disto, ao comparar os fluidos biodegradáveis é perceptível que o fluido a base de óleo de babaçu apresenta uma ligeira vantagem em relação ao fluido a base de óleo de mamona, levando em consideração a influência de seus arcos capacitivos na velocidade da reação eletroquímica.

4.3.3 Análise de Polarização Linear

O último experimento eletroquímico realizado foi o de polarização linear nas três emulsões estudadas neste trabalho. A Figura 33 apresenta um gráfico representativo de polarização linear formado pelo potencial de corrosão e potencial de corrente. A partir dessa análise pode-se avaliar que as emulsões que apresentarem maior corrente de corrosão ao longo do ensaio terão maior cinética no processo corrosivo.



Fonte: Autoria própria (2021).

De acordo com a Figura 33 é perceptível que os fluidos biodegradáveis apresentam maior corrente de corrosão e conseqüentemente uma maior velocidade no processo de corrosão que a emulsão a base de fluido comercial sintético, contudo percebe-se que os valores se encontram bem próximos.

Nesse sentido, se torna pertinente avaliar a influência dos fluidos na superfície das amostras devido a perturbação realizada no sistema durante ensaio de polarização linear. Sendo assim, a Figura 34 apresenta uma comparação de microscopias ópticas adquiridas das superfícies das amostras de cada ensaio.

Figura 34 – Microscopia óptica da superfície das amostras metálicas do ensaio de polarização linear



Fonte: Autoria própria (2021).

Tendo como base as microscopias apresentadas na Figura 34 pode-se inferir que o processo de corrosão foi maior na amostra que passou pelo processo de polarização envolvendo o fluido a base de mamona, enquanto as outras duas amostras apresentaram resultados similares. Dessa maneira, percebe-se a importância de avaliar a corrosão gerada na superfície, pois apenas assim, conseguiu-se diferenciar o resultado entre as emulsões biodegradáveis.

4.4 ANÁLISE DE USINABILIDADE

Na análise de usinabilidade foram levantados os dados de vida de ferramenta e acabamento superficial dos corpos de provas usinados para verificar a viabilidade técnica de utilização dos fluidos estudados no processo de usinagem.

4.4.1 Análise de vida de ferramenta

A análise da vida da ferramenta de corte é parte fundamental na avaliação da viabilidade técnica da aplicação das emulsões a base de óleo de babaçu e mamona em processos de usinagem. Assim, o primeiro aspecto estudado foi a vida da ferramenta baseada no desgaste de flanco médio (VB_B) nos diferentes cenários que foram apresentados na metodologia deste trabalho. Sendo assim, a Tabela 11 apresenta os valores calculados para o intervalo de confiança (com 95% de confiança) da média populacional da variável aleatória *Tempo de vida da aresta cortante* adquirida a partir de cada condição dos ensaios de usinagem.

Tabela 11 – Intervalos de confiança para a variável aleatória *Tempo de vida da aresta* cortante para cada condição dos ensaios de usinagem.

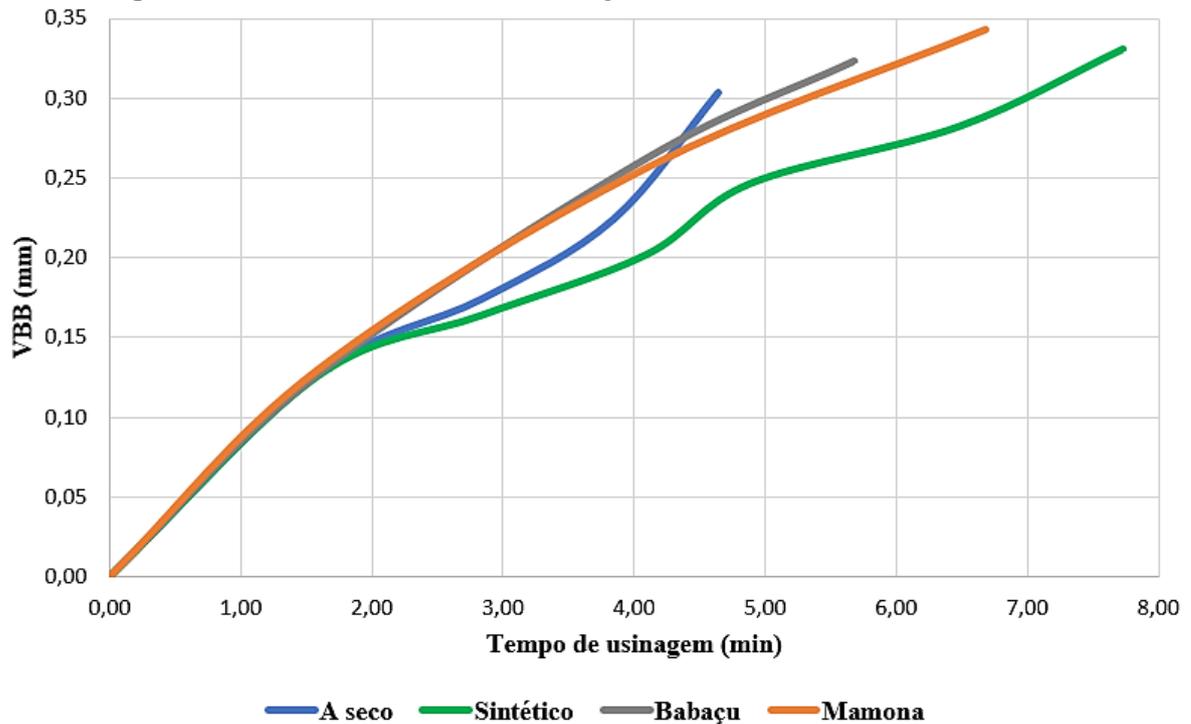
Condição de lubrificação 		Seco	Sintético	Babaçu	Mamona	
Tempo de vida da aresta cortante com $V_c = 90$ m/min (Até $VB_B = 0,3$ mm)	Média amostral (\bar{x}), min	5,44	8,10	5,45	6,55	
	Desvio padrão amostral (s), min	1,13	0,52	0,32	0,18	
	Intervalo de confiança (95%) para a média populacional da variável <i>Tempo de vida da aresta cortante</i>	Limite superior	7,01	8,82	5,89	6,80
		Limite inferior	3,87	7,38	5,01	6,30
Tempo de vida da aresta cortante com $V_c = 70$ m/min (Até $VB_B = 0,3$ mm)	Média amostral (\bar{x}), min	6,84	9,79	13,34	15,46	
	Desvio padrão amostral (s), min	0,00	0,47	1,88	1,12	
	Intervalo de confiança (95%) para a média populacional da variável <i>Tempo de vida da aresta cortante</i>	Limite superior	6,84	10,44	15,95	17,01
		Limite inferior	6,84	9,14	10,73	13,91
Tempo de vida da aresta cortante com $V_c = 50$ m/min (Até $VB_B = 0,3$ mm)	Média amostral (\bar{x}), min	10,17	50,59	63,73	66,62	
	Desvio padrão amostral (s), min	0,00	3,36	2,23	2,05	
	Intervalo de confiança (95%) para a média populacional da variável <i>Tempo de vida da aresta cortante</i>	Limite superior	10,17	55,25	66,82	69,46
		Limite inferior	10,17	45,93	60,64	63,78

Fonte: Autoria própria (2021).

A partir da Tabela 11 pode-se inferir que com o decaimento da velocidade de corte, os fluidos a base de óleo vegetal apresentaram melhor desempenho, proporcionando vidas de ferramenta maiores que utilizando o fluido sintético ou a usinagem a seco. Além disso, é importante salientar que em todas as condições em meio fluido obteve-se maior tempo de vida de ferramenta do que na usinagem a seco, aspecto este que já era esperado.

Dentre os fluidos biodegradáveis é possível notar que a emulsão a base de óleo de mamona desempenhou melhor papel no controle do desgaste da ferramenta, proporcionando em velocidades mais baixas, a menor taxa de desgaste dentre todas as condições estudadas. Com o intuito de apresentar detalhadamente o comportamento dos fluidos durante a usinagem serão apresentadas a seguir as curvas de vida da ferramenta utilizada, iniciando pela análise a partir da velocidade de corte de 90 m/min observada na Figura 35.

Figura 35 – Curvas de vida da ferramenta para a velocidade de corte de 90 m/min



Fonte: Autoria própria (2021).

Verificando-se as curvas de vida de ferramenta apresentadas na Figura 35 percebe-se que o melhor desempenho quanto ao desgaste foi o do fluido comercial sintético, seguido pelos fluidos a base de óleo de mamona e babaçu. Este fenômeno pode ser explicado pela capacidade refrigerante de cada fluido, tendo em vista que essa condição é a que apresenta maior geração de calor durante o processo de corte. Nesse sentido, a fim de avaliar a influência do aspecto descrito, foi realizada uma análise comparativa das temperaturas geradas em todas as condições de usinagem, apresentada na Tabela 12.

Tabela 12 – Temperaturas geradas em cada ensaio de usinagem

Condição de lubrificação	Seco	Sintético	Babaçu	Mamona
Temperatura de corte (°C) para $V_c = 90$ m/min	61,0	34,8	36,0	40,0
Temperatura de corte (°C) para $V_c = 70$ m/min	58,0	33,8	35,3	39,6
Temperatura de corte (°C) para $V_c = 50$ m/min	53,0	33,4	37,0	41,5

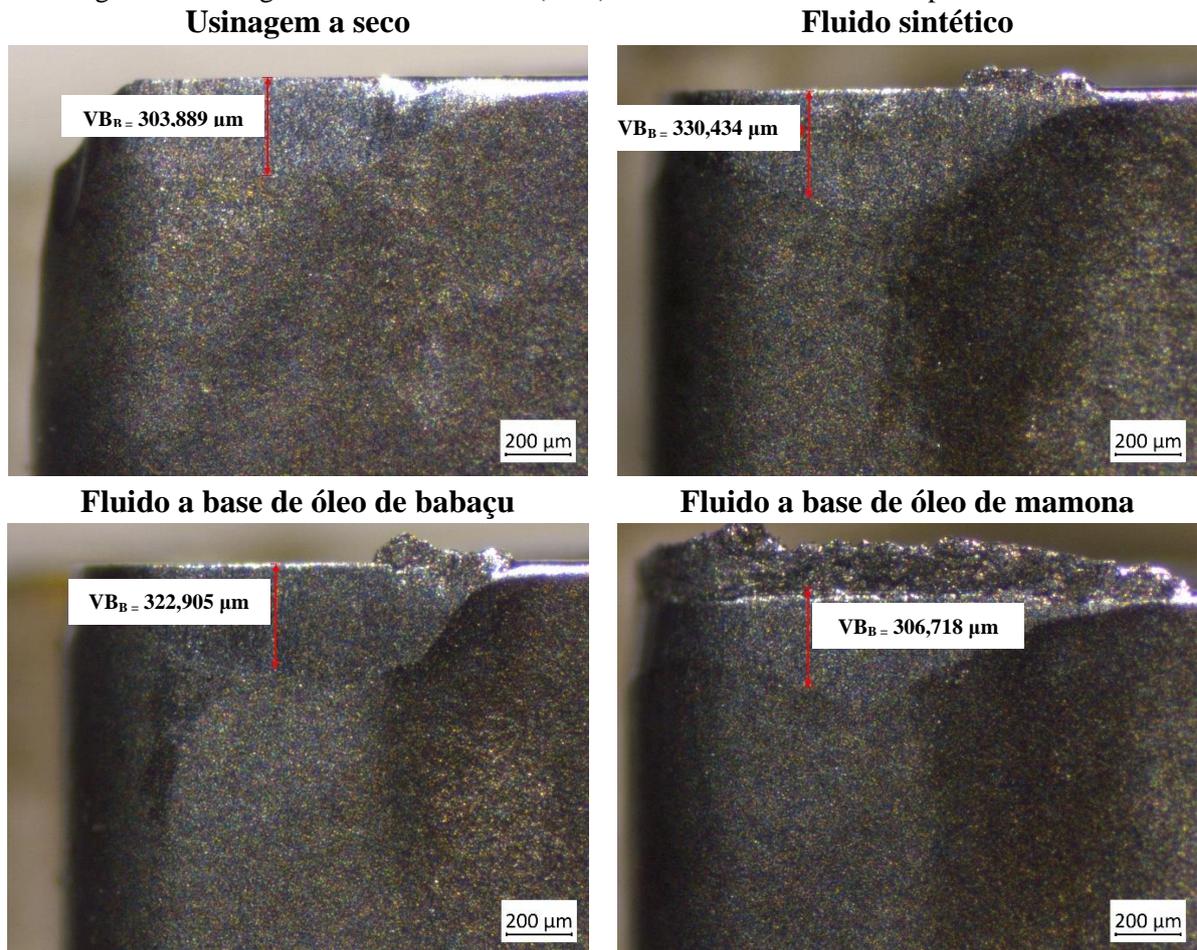
Fonte: Autoria própria (2021).

Em um contexto geral, a Tabela 12 especifica que as melhores propriedades refrigerantes entre os três fluidos são apresentadas pela emulsão sintética, tendo uma redução

média de aproximadamente 40,7% da temperatura gerada em comparação a usinagem a seco. Contudo, os fluidos a base de óleo de babaçu e mamona também apresentaram um comportamento aceitável com relação sua capacidade refrigerante, apresentando uma redução de temperatura de 37,0% e 29,3%, respectivamente.

De maneira complementar, se torna fundamental verificar o desgaste gerado na superfície de folga da ferramenta, pois principalmente devido a mudança na temperatura da zona de corte com o uso de fluidos de corte, podem acontecer alguns fenômenos durante o processo. Assim, a Figura 36 apresenta as aquisições de desgaste de flanco (VB_B) para ambas as condições de corte no fim da vida da ferramenta.

Figura 36 – Desgaste de Flanco Médio (VB_B) no fim de vida das arestas para $V_c = 90$ m/min

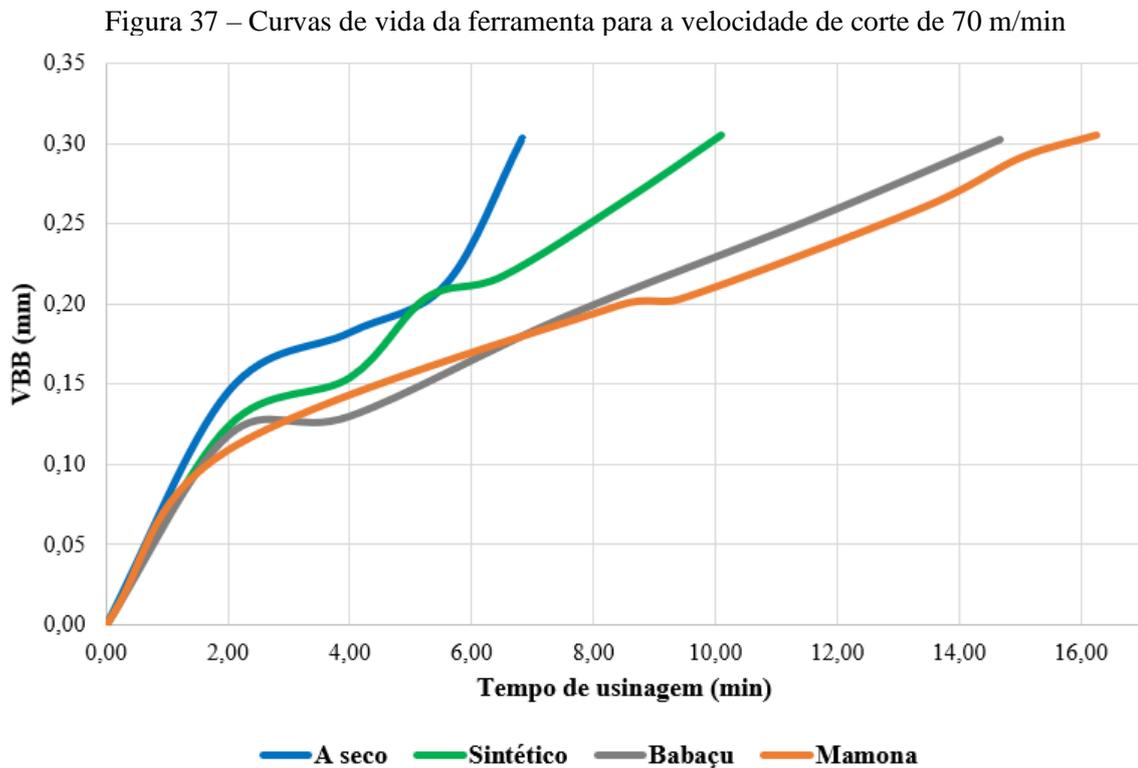


Fonte: Autoria própria (2021).

A partir dos resultados mostrados na Figura 36 identifica-se a presença de Aresta Postiça de Corte (APC), em decorrência da redução da temperatura durante o corte. Contudo, verifica-se que o calor gerado influencia diretamente no aparecimento deste fenômeno, pois

ao avaliar a superfície de folga da ferramenta usada no ensaio a seco não se percebe nenhum resquício de sua existência.

Sendo assim, pode-se inferir que com a redução da velocidade de corte, conseqüentemente, tem-se uma menor temperatura gerada, solicitando tanto capacidade lubrificante quanto refrigerante do fluido utilizado. Dessa maneira, a Figura 37 apresenta as curvas de vida dos quatro ensaios utilizando a uma velocidade de corte de 70 m/min.

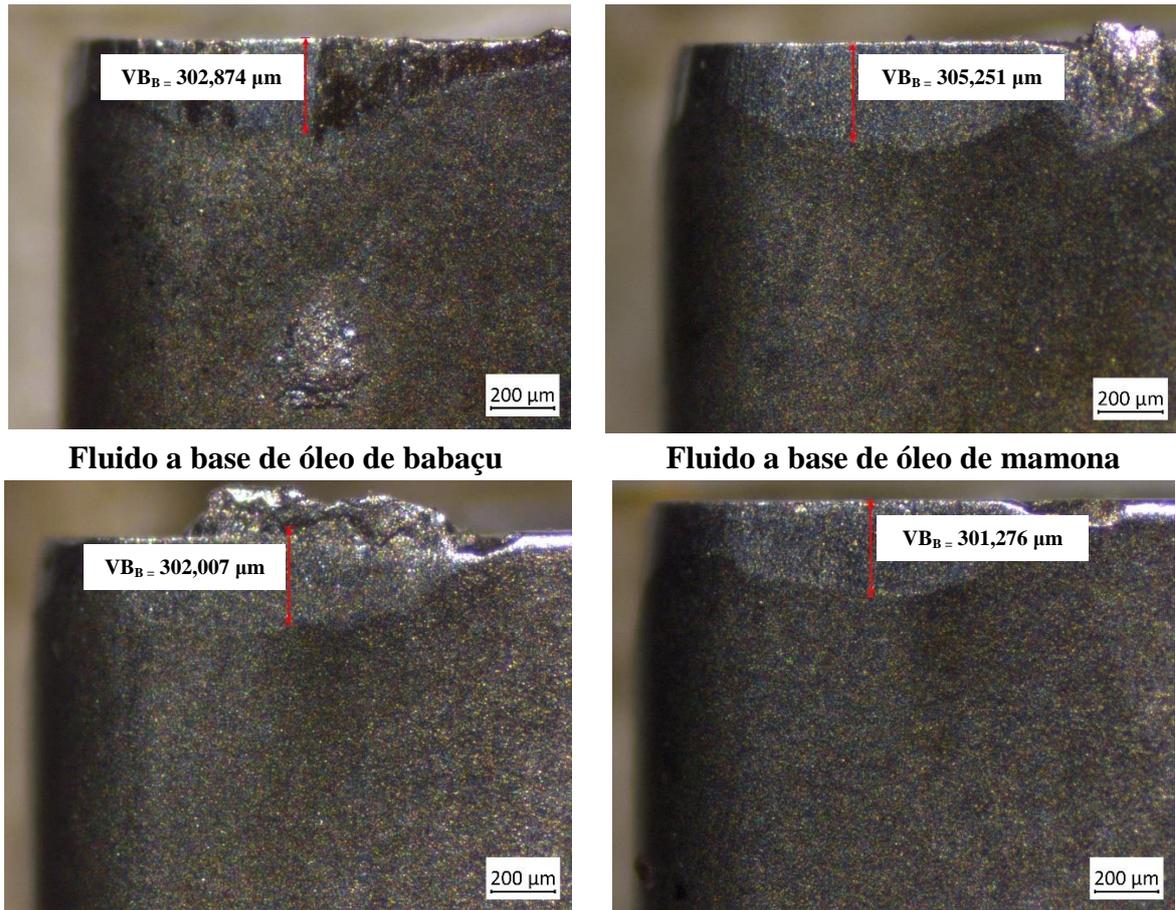


Fonte: Autoria própria (2021).

Na Figura 37 verifica-se que o fluido a base óleo de mamona proporcionou um menor desgaste na ferramenta e, conseqüentemente, um maior tempo de usinagem antes de alcançar o critério de fim de vida, além de a emulsão a base de óleo de babaçu também gerar um resultado satisfatório. Nesse sentido, percebe-se que ambos os fluidos biodegradáveis são melhores para a ferramenta de corte em comparação com o fluido sintético e a usinagem a seco, levando em consideração esta velocidade de corte.

Nesse ponto, tornou-se pertinente a análise da superfície desgastada da ferramenta para verificar se ainda existia a formação de APC, tendo em vista que este fenômeno pode gerar desgaste por *attrition*. Com este intuito a Figura 38 ilustra as aquisições de VB_B nas ferramentas utilizando a velocidade de corte de 70 m/min.

Figura 38 – Desgaste de Flanco Médio (VB_B) no fim de vida das arestas para $V_c = 70$ m/min
Usinagem a seco **Fluido sintético**

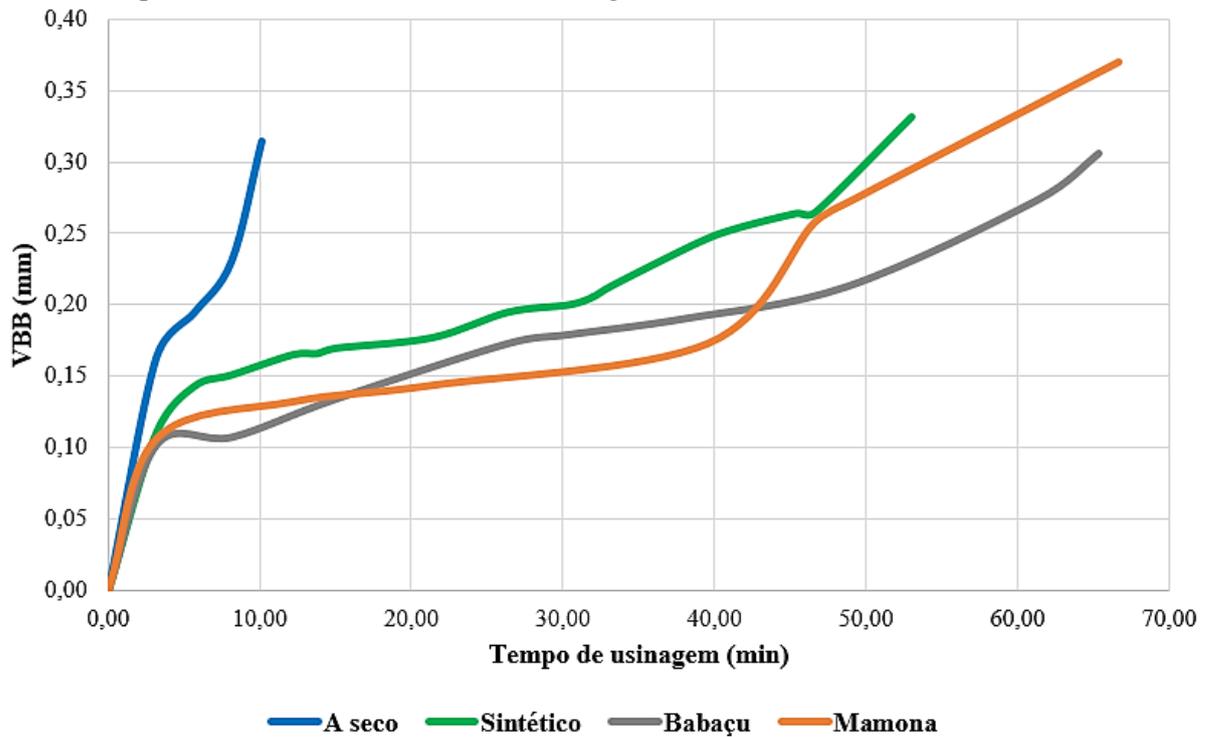


Fonte: Autoria própria (2021).

A partir da Figura 38 ainda se percebe a existência da aresta postiça de corte, principalmente ao usar o fluido a base óleo de babaçu e sintético. Além disso, durante o processo de levantamento de dados de desgaste, a ferramenta utilizada juntamente a emulsão a base de óleo de mamona evidenciou diversas vezes a sua presença, gerando o arrancamento de algumas lascas da aresta cortante. Sobretudo, novamente não houve o aparecimento deste fenômeno no ensaio de usinagem a seco.

De maneira paralela, seguindo a linha de raciocínio com relação ao processo analisado, ao se diminuir mais ainda a velocidade de corte, tem-se uma maior necessidade de lubrificação durante o corte, tendo em vista o aumento das forças e atrito gerado durante o corte. Sendo assim, a Figura 39 representa as curvas de vida para a menor velocidade de corte estudada.

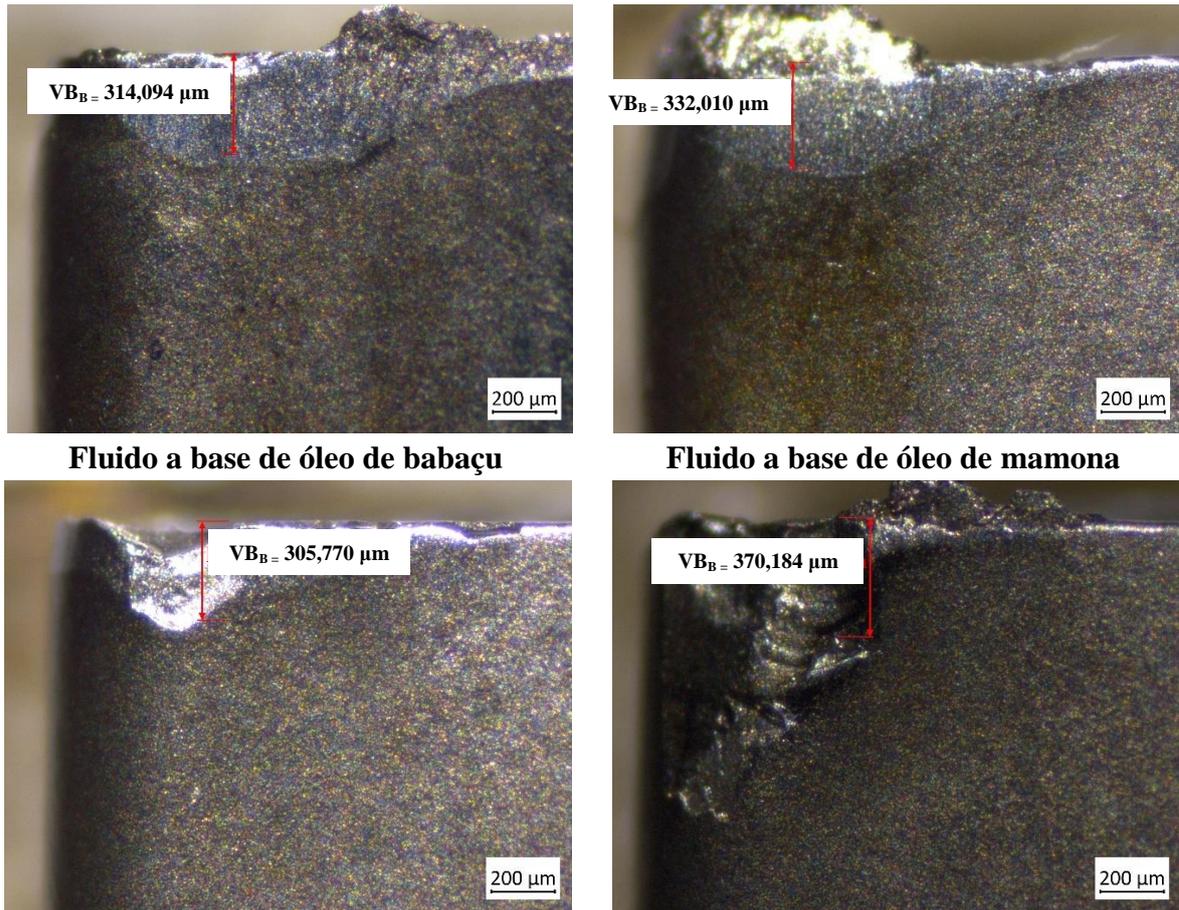
Figura 39 – Curvas de vida da ferramenta para a velocidade de corte de 50 m/min



Fonte: Autoria própria (2021).

Em linhas gerais, é perceptível a partir da Figura 39 que os fluidos biodegradáveis ainda apresentam melhor resultado na vida da ferramenta que nas demais condições de corte avaliadas, evidenciando que sua principal característica é o alto poder lubrificante durante os processos de usinagem. De maneira complementar, a Figura 40 representa o comportamento da superfície de folga da ferramenta ao final deste ensaio.

Figura 40 – Desgaste de Flanco Médio (VB_B) no fim de vida das arestas para $V_c = 50$ m/min
Usinagem a seco **Fluido sintético**



Fonte: Autoria própria (2021).

Na Figura 40 percebe-se micro-lascamentos nas arestas utilizadas nos ensaios com fluidos de corte, sendo detectadas as condições mais agravantes ao utilizar as emulsões biodegradáveis, contudo estas ainda tiveram uma vida de ferramenta maior que a aresta cortante com a emulsão comercial sintética. Além disso, ao observar o desgaste de flanco obtido na usinagem a seco encontra-se material agregado na superfície de saída da pastilha.

De maneira complementar, é perceptível que existem dois comportamentos distintos nas curvas de vida da ferramenta. Sendo assim, na condição a seco identifica-se uma rápida progressão do desgaste até chegar à estabilização, uma pequena zona de estabilidade e novamente um rápido crescimento do desgaste. Contudo, ao avaliar as curvas de vida dos ensaios com fluidos de corte, percebe-se uma progressão rápida até a estabilização, depois uma zona de estabilidade que é mantida praticamente até o fim da vida da ferramenta.

Em um contexto mais amplo, é possível avaliar que em condições que exigem maior poder refrigerante o fluido ideal é o sintético, contudo ao se diminuir o calor gerado, os fluidos biodegradáveis evidenciam um melhor desempenho na vida da ferramenta. Por fim, a

usinagem a seco não apresenta resultados satisfatórios com relação a vida da ferramenta, contudo é uma possibilidade que gera o menor custo fixo para o processo, sendo assim, se torna importante uma avaliação de viabilidade econômica.

4.4.2 Análise de acabamento superficial

Outra avaliação importante para a usinabilidade é relativa ao acabamento superficial da peça gerada, pois este é um dos pontos de vista técnicos que apresenta a viabilidade de aplicação industrial. Nesse sentido, a Tabela 13 representa os dados obtidos a partir das medições de rugosidade gerada na superfície da peça. Vale ressaltar ainda que as medidas foram realizadas por meio de medições em partes distintas da peça. Além disto, também são apresentados os valores calculados para o intervalo de confiança (com 95% de confiança) da média populacional da variável aleatória *Rugosidade média das peças* adquirida a partir de cada condição dos ensaios de usinagem.

Tabela 13 – Intervalos de confiança para a variável aleatória *Rugosidade média das peças* para cada condição dos ensaios de usinagem

Condição de lufrefrigeração 		Seco	Sintético	Babaçu	Mamona	
Rugosidade superficial da peça na Vc = 90 m/min	Média amostral (\bar{x}), μm	1,84	1,88	1,70	1,88	
	Desvio padrão amostral (s), μm	0,29	0,25	0,15	0,16	
	Intervalo de confiança (95%) para a média populacional da variável <i>Rugosidade média das peças</i>	Limite superior	1,99	2,03	1,79	1,97
		Limite inferior	1,68	1,74	1,61	1,78
Rugosidade superficial da peça na Vc = 70 m/min	Média amostral (\bar{x}), μm	1,82	1,77	2,04	2,59	
	Desvio padrão amostral (s), μm	0,28	0,27	0,20	0,29	
	Intervalo de confiança (95%) para a média populacional da variável <i>Rugosidade média das peças</i>	Limite superior	1,97	1,97	2,15	2,76
		Limite inferior	1,66	1,56	1,93	2,43
Rugosidade superficial da peça na Vc = 50 m/min	Média amostral (\bar{x}), μm	2,72	2,07	2,88	3,00	
	Desvio padrão amostral (s), μm	0,30	0,27	0,44	0,22	
	Intervalo de confiança (95%) para a média populacional da variável <i>Rugosidade média das peças</i>	Limite superior	2,89	2,22	3,14	3,13
		Limite inferior	2,55	1,91	2,63	2,87

Fonte: Autoria própria (2021).

Em um contexto geral, verifica-se a partir da Tabela 13 que na velocidade de corte de 90 m/min todas as condições analisadas apresentaram resultados similares, contudo a menor rugosidade é desempenhada pela usinagem com a emulsão a base de óleo de babaçu. Em contrapartida, ao diminuir para a velocidade de corte para 70 m/min, a qualidade da superfície gerada pelas emulsões de óleo vegetal piora, apresentando valores maiores que a condição a seco e com a emulsão a base de óleo sintético. Esse fato se agrava ao avaliar a rugosidade na velocidade de corte de 50 m/min.

Esta constatação negativa com relação às emulsões biodegradáveis aconteceu devido a existência da aresta postiça de corte durante o torneamento, onde além de o material ficar agregado na ferramenta, algumas partículas deste também se dispersaram pela peça. Contudo, os valores obtidos utilizando fluido a base de óleo de babaçu se mostraram mais próximos dos encontrados na condição a seco, sendo este fenômeno explicado por meio do baixo coeficiente de atrito gerado ao se utilizar essa emulsão com o par composto da ferramenta de metal duro e da peça do aço SAE 1045.

4.5 ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA DOS FLUIDOS ESTUDADOS

A análise de viabilidade econômica dos fluidos estudados abordou o levantamento de seus custos, tanto de produção quanto de utilização no processo de usinagem, bem como de descarte. Além disso, nesta seção é apresentada uma análise econômica que verifica a viabilidade em condições de corte diferentes.

4.5.1 Levantamentos de custos das emulsões

O primeiro ponto econômico avaliado foi o de custo de produção e descarte de cada emulsão. Sendo assim, a partir das informações apresentadas no tópico 3.2.5 foi realizado um levantamento dos custos para a fabricação e destinação final de cada emulsão. É importante enfatizar que para a análise em questão não foi considerado nenhum custo para a usinagem a seco. A Tabela 14 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 14 – Custos de produção e descarte das emulsões

		Custo em R\$/L		
		Emulsão de óleo sintético	Emulsão de óleo de babaçu	Emulsão de óleo de mamona
Fator	Mão-de obra	4,49	4,49	4,49
	Maquinário	0,79	0,79	0,79
	Matéria-prima	6,37	8,74	5,92
	Descarte	2,56	-	-
	Total	14,21	14,02	11,20

Fonte: Autoria própria (2021).

A partir dessa análise percebe-se que a formulação de óleo de mamona apresenta um menor custo, principalmente devido ao valor da matéria-prima. Além disso, a emulsão que utiliza óleo de babaçu apresenta menor custo quando comparada à sintética, que tem como ponto negativo a necessidade de descarte.

De maneira complementar, outro ponto economicamente fundamental é a avaliação dos custos relativos ao processo de usinagem. Nesse caso, considerou-se para cada condição de corte, os valores gastos com insertos e com o sistema de bombeamento dos fluidos, pois os demais custos se equiparam para todas as configurações analisadas. Nesse sentido, devido ao desgaste das ferramentas ser diferente para cada velocidade, realizou-se uma análise considerando os custos em cada condição de corte. Sendo assim, a Tabela 15 apresenta os custos para as três velocidades de corte testadas.

Tabela 15 – Custos de usinagem para diferentes velocidades de corte

Condição de lubrificação		Seco	Sintético	Babaçu	Mamona
Custos de usinagem para $V_c = 90$ m/min	Custo de produção e descarte do fluido (R\$/m) OBS.: Considerou-se a capacidade do reservatório do torno para o cálculo.	-	170,52	168,24	134,40
	Custo com ferramentas de corte (R\$/m)	22,82	14,05	22,82	18,25
	Custo com o sistema de bombeamento de fluido (R\$/m)	-	0,02	0,02	0,02
	Total (R\$/m)	22,82	184,59	191,08	152,67
	Total (US\$/m)	4,53	36,61	37,90	30,28
Custos de usinagem para $V_c = 70$ m/min	Custo de produção e descarte do fluido (R\$/m) OBS.: Considerou-se a capacidade do reservatório do torno para o cálculo.	-	170,52	168,24	134,40
	Custo com ferramentas de corte (R\$/m)	22,82	15,25	11,41	9,59
	Custo com o sistema de bombeamento de fluido (R\$/m)	-	0,02	0,02	0,02
	Total (R\$/m)	22,82	185,79	179,67	144,01
	Total (US\$/m)	4,53	36,85	35,64	28,56
Custos de usinagem para $V_c = 50$ m/min	Custo de produção e descarte do fluido (R\$/m) OBS.: Considerou-se a capacidade do reservatório do torno para o cálculo.	-	170,52	168,24	134,40
	Custo com ferramentas de corte (R\$/m)	22,82	4,02	3,20	3,10
	Custo com o sistema de bombeamento de fluido (R\$/m)	-	0,02	0,02	0,02
	Total (R\$/m)	22,82	174,56	171,46	137,52
	Total (US\$/m)	4,53	34,62	34,01	27,28

Fonte: Autoria própria (2021).

Ao analisar as informações da Tabela 15 percebe-se visivelmente que a usinagem a seco apresenta o diferencial de não ter custos com relação à produção, descarte e bombeamento de fluido e, dessa maneira, é o processo que tem o menor custo total. Contudo, é previsível que com o aumento do tempo de usinagem existirá um ponto em que as condições em meio fluido serão economicamente mais vantajosas.

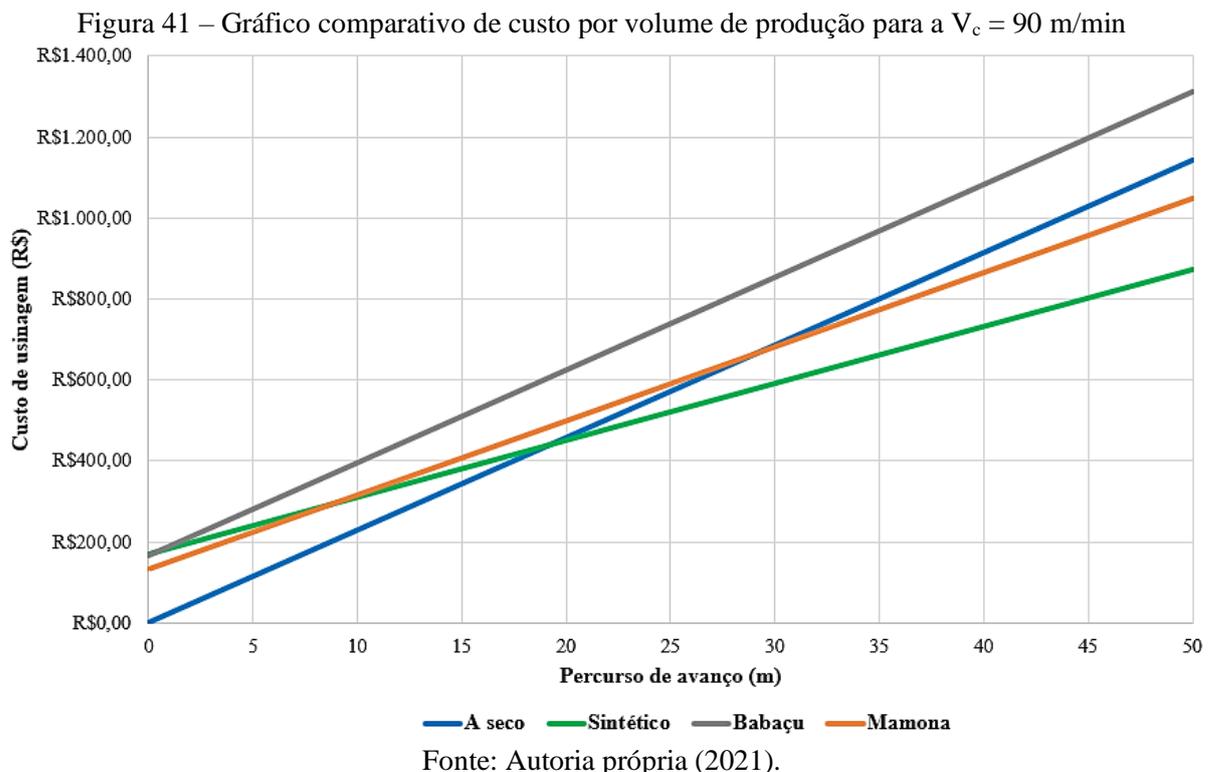
Levando-se em consideração as informações de custo relativas às emulsões, verifica-se que, para as três velocidades de corte consideradas, a emulsão a base de óleo de mamona

apresenta menores valores quando comparada com as outras duas emulsões. Além disso, os fluidos a base de óleo de babaçu e comercial sintético, apresentam valores muito próximos para todas as velocidades de corte.

Torna-se ainda importante uma análise econômica relativa às três condições de corte, com o objetivo de se verificar a viabilidade de cada fluido em decorrência do comprimento usinado, pois haverá situações em que será mais vantajoso utilizar a usinagem a seco ou determinados fluidos.

4.5.2 Análise econômica

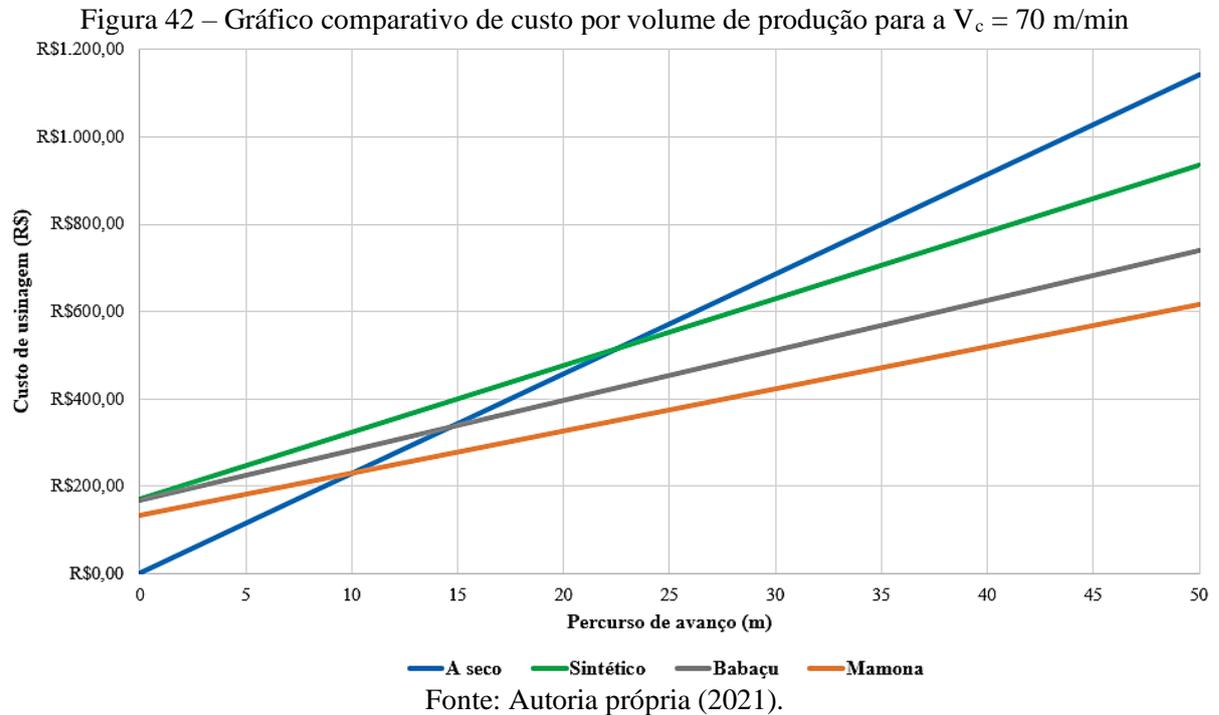
Como análise complementar foi realizada uma avaliação econômica para cada velocidade de corte utilizada. Essa avaliação identifica pontos em que determinadas condições são mais viáveis que outras por meio da variação comprimento usinado. Assim, inicialmente, realizou-se a análise econômica referente aos ensaios com velocidade de corte igual a 90 m/min, apresentado na Figura 41.



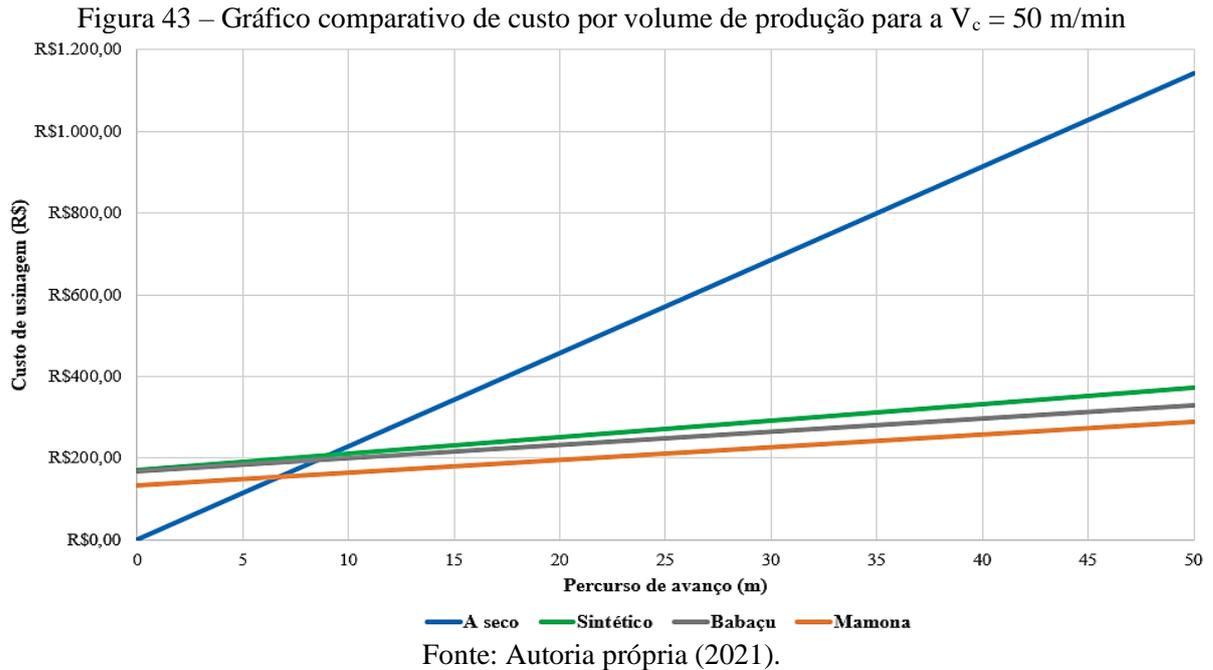
Analisando-se a Figura 41 nota-se que até o valor de 19,43 metros de usinagem é viável financeiramente utilizar a usinagem a seco. Contudo, a partir deste valor o fluido sintético apresenta menor custo de usinagem, sendo esta a melhor escolha. Além disso, pode-

se inferir que a emulsão a base de óleo de mamona apresentou menor custo que a usinagem a seco para percursos de avanço acima de 29,45 metros.

Devido às mudanças referentes ao custo das arestas de corte utilizadas foi necessária a criação de um novo gráfico comparativo para a condição com velocidade de corte de 70 m/min. Dessa maneira, a Figura 42 apresenta a análise econômica para essa condição.



Por meio da análise econômica apresentada na Figura 42 nota-se que a condição a seco é a mais vantajosa economicamente até um percurso de avanço de 10,16 metros, sendo a emulsão a base de óleo de mamona, a melhor escolha para o processo a partir deste valor. De maneira similar, os fluidos a base de óleo babaçu e sintético apresentaram melhores resultados em comparação com a usinagem a seco acima de 14,77 e 22,58 metros, respectivamente. Uma última investigação realizada foi com relação a viabilidade econômica relacionada a condição de menor velocidade de corte, apresentada na Figura 43.



Ao explorar a Figura 43 identifica-se que com a redução da velocidade de corte, ocorre também a redução da faixa viável para a utilização da usinagem a seco, sendo esta em todos os casos abaixo de 10 metros de percurso de avanço. Nesse contexto, após 6,82 metros de usinagem, a emulsão a base de óleo de mamona se torna a melhor escolha, seguida respectivamente, pelas emulsões a base de óleo de babaçu e fluido comercial sintético.

Portanto, utilizando esta análise econômica identificou-se a faixa onde cada fluido apresenta a melhor viabilidade para o processo estudado. Sendo assim, a Tabela 16 apresenta um resumo da discussão realizada neste tópico, facilitando o entendimento dos resultados encontrados.

Tabela 16 – Resumo da avaliação de viabilidade econômica

Condição	Faixa de viabilidade	
	A seco	Fluido substituinte financeiramente
$V_c = 90$ m/min	$0 \leq L_f \leq 19,43$ m	Sintético
$V_c = 70$ m/min	$0 \leq L_f \leq 10,16$ m	Mamona
$V_c = 50$ m/min	$0 \leq L_f \leq 6,82$ m	Mamona

Fonte: Autoria própria (2021).

5 CONCLUSÕES

De uma maneira geral, a partir deste trabalho foi possível realizar uma análise comparativa do ponto de vista técnico e de viabilidade econômica entre os fluidos de corte biodegradáveis propostos nesta pesquisa, juntamente ao fluido comercial sintético usualmente utilizado em operações de usinagem. Sendo assim, esta comparação avaliou o desempenho de cada formulação em operações de torneamento e seus relativos custos, além de seus aspectos corrosivos e tribológicos.

Com uma visão mais específica, foram desenvolvidos estudos tribológicos que identificaram a influência dos fluidos no coeficiente de atrito gerado entre duas superfícies, por meio de ensaio de configuração pino-disco, onde a emulsão a base de óleo de babaçu apresentou os melhores resultados. Além disto, realizou-se uma avaliação de desgaste no disco, evidenciando as melhores propriedades do fluido sintético na redução da deterioração da superfície estudada no ensaio.

Complementarmente, verificou-se as propriedades corrosivas de ambos os fluidos, de modo a examinar comparativamente estas características. Nesse sentido, identificou-se grande eficiência de inibição da corrosão advinda do fluido sintético, seguido respectivamente pelas formulações a base de óleo de babaçu e mamona que não apresentaram resultados aceitáveis.

Do ponto de vista técnico relativo à usinagem, estudou-se a vida útil das ferramentas de corte para cada condição de usinagem, tanto em meio fluido quanto a seco. Nestes ensaios percebeu-se que à medida que se diminuía a velocidade de corte encontrava-se uma situação mais propícia para a utilização dos fluidos de corte biodegradáveis, alcançando nestes casos vidas de ferramenta, acima de 1 hora.

Outra condição importante para a usinabilidade é o acabamento superficial da peça gerada pelo processo, sendo este um dos objetivos da análise realizada nesta pesquisa. Neste sentido, os melhores valores medidos foram referentes ao torneamento realizado com o fluido sintético, que apresentou uma rugosidade média de no máximo 2,07 μm .

Por fim, avaliou-se a viabilidade econômica das 12 condições utilizadas nos ensaios de vida de ferramenta. Sendo assim, identificou-se por meio de uma avaliação comparativa de custo por volume de produção que até um certo comprimento usinado a condição de usinagem a seco se sobressai, contudo ao se aumentar esta variável se torna mais viável economicamente a utilização de fluidos de corte, principalmente devido a diluição de seus custos fixos na produção realizada.

Nesse contexto, na maior velocidade de corte estudada nesta pesquisa foi determinada que a melhor escolha seria o fluido comercial sintético, e para as velocidades mais baixas a emulsão a base de mamona tem vantagem econômica. Por se tratar de uma avaliação de viabilidade para aplicações industriais, se torna evidente que estes dois fluidos são os mais indicados e apresentam melhor desempenho, tanto técnico quanto econômico.

Por meio dos resultados obtidos nesta pesquisa pode-se concluir que as emulsões a base de óleo vegetal apresentam resultados satisfatórios relativos à sua utilização em processos de usinagem, em certas situações melhores até que o fluido sintético utilizado convencionalmente neste tipo de operações. Sendo assim, é comprovado a partir desta pesquisa que as emulsões estudadas têm grande potencial de utilização na indústria, se tornando uma alternativa viável técnica e economicamente para este tipo de aplicação.

5.1 PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

Como propostas de trabalhos futuros é possível citar o estudo relativo à incrementação de formulações biocidas e anticorrosivas biodegradáveis aos fluidos a base de óleo vegetal, visando reduzir a proliferação de agentes biológicos no fluido, que podem causar doenças no colaborador, além da redução do efeito da corrosão nos materiais metálicos, que pode causar alta oxidação nas peças usinadas.

Outro estudo a ser considerado, seria a replicação desta pesquisa para as demais formulações desenvolvidas por França (2018), de maneira a obter uma visão mais ampla das opções existentes tanto do ponto de vista técnico para a usinagem, quanto de viabilidade econômica.

REFERÊNCIAS

- ABNT NBR ISO 3685. Tool Life Testing with Single-Point Turning Tools, 2017.
- ABNT NBR ISO 4287. Especificações Geométricas do Produto (GPS) – Rugosidade – Método do Perfil – Termos, Definições e Parâmetros de Rugosidade, 2002.
- ALUYOR, E. O.; KESSINGTON, O. O.; MUDIACHEOGHENE. Biodegradation of vegetable oils: a review. *Scientific Research and Essay*, v. 4, n. 6, p. 543-548, 2009.
- ALVES, M. C. S.; BIANCHI, E. C.; AGUIAR, P. R. Influência das técnicas de mínima quantidade de lubrificante, refrigeração otimizada e refrigeração convencional na qualidade de peças produzidas com aços endurecidos no processo de retificação. *Revista chilena de ingeniería*, vol. 18, n. 2, p. 228-234, Ingeniare, 2010.
- ANTON PAAR. Reference Guide TRB: pin-on-disc tribometer, 2021.
- ANTSEV, A. V. Cutting tool life prediction in case of rough machining by the fracture model. *Materials Today: Proceedings*, v. 19, n. 3, p. 2148-2151, 2019.
- ARAÚJO JUNIOR, A. S. **Desempenho de óleos vegetais comestíveis aplicados por MQF no fresamento frontal do aço ABNT 1045**. 2013. 163f. Tese (doutorado). Universidade Federal de Uberlândia – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Uberlândia, 2013.
- ARAÚJO JUNIOR, A. S.; SALES, W. F.; SILVA, R. B.; COSTA, E. S.; MACHADO, A. R. Lubri-cooling and tribological behavior of vegetable oils during milling of AISI 1045 steel focusing on sustainable manufacturing. *Journal of Cleaner Production*, v. 156, p. 635-647, 2017.
- ASTAKHOV, V. P.; DAVIM, J.P. **Measurement in Machining and Tribology**. (Cap 1) Improving Sustainability of Machining Operation as a System Endeavor. Springer: p. 1-29, 2019.
- ASTM G99. Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus, 2017.
- BARROS, A. J.; NIZA, E. M.; RIGO, J. S.; SILVA, L. H. D.; CASTRO, M. D. G. Gestão de tratamentos resíduos de usinagem: proposta viável para mitigações ambientais. *Integrada - Revista científica da FACOL/ISEOL*, vol. IV, Lenções Paulista, 2017.
- BENEDICTO, E.; CAROU, D.; RUBIO, E. M. Technical, Economic and Environmental Review of the Lubrication/Cooling Systems used in Machining Processes. *Procedia Engineering*, v. 184, p. 99-116, 2017.
- BRENNER, D.; WEBER, C.; LENZ, J.; WESTKAEMPER, E. Total Tool Cost of Ownership Indicator for Holistical Evaluations of Improvement Measures within the Cutting Tool Life Cycle. *51st CIRP Conference on Manufacturing Systems*, v. 72, p. 1404-1409, 2018.
- CHETAN; GHOSH, S.; RAO, P. V. *Application of sustainable techniques in metal cutting for enhanced machinability: a review*. *Journal Of Cleaner Production*, v. 100, p.17-34, 2015.

CM PRODUTOS SIDERURGICOS. Certificado de qualidade do aço SAE 1045. 2021.

COMMITTEE, A. I. H., **Metal Handbook**. 6ª Edição (Cap. 27). p. 14-16, 1991.

DASSISTI, M.; CHIARELLO, F.; FANTONI, G.; PRIARONE, P. C.; INGARAO, G.; CAMPANA, G.; MATTA, A.; CIMATTI, B.; COLLEDANI, M.; FRIGERIO, N.; FORCELLESE, A.; SIMONCINI, M. Benchmarking the sustainable manufacturing paradigm via automatic analysis and clustering of scientific literature: A perspective from Italian technologists. *Procedia Manufacturing*, v. 33, p. 153-159, 2019.

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

DING, F.; HE, Z. Cutting tool wear monitoring for reliability analysis using proportional hazards model. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 57, p. 565-574, 2011.

DINIZ, A.E.; MARCONDES, F.C.; COPPINI, N.L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 8. ed. São Paulo: Artliber, 2013. 243 p.

_____. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 9. ed. São Paulo: Artliber, 2014. 243 p.

EEEP. **Curso técnico em mecânica**. Escola Estadual de Educação Profissional - Secretaria de Educação do Governo do Ceará, Ceará: 2010. Disponível em: <https://www.seduc.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/37/2012/06/mecanica_usinagem_com_maquinas_convencionais.pdf>. Acesso em: 03 out. 2019.

EL BARADIE, M. A. Cutting fluids: part I. characterization. *Journal of Material Processing Technology*. V. 54, p. 786-797. 1996.

FERNANDES, M. E. P. **Torneamento do aço-ferramenta AISI D6 temperado e revenido nas condições seco, jorro e LN2: Uma análise técnico-econômica**. 2019. 122f. Dissertação (mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Norte – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Natal, 2019.

FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. São Paulo: Blucher, 1977.

FERRÉS, J. D. A indústria de óleos vegetais e a produção de biodiesel no Brasil. *Abiove* 2003. Disponível em: <http://www.camara.gov.br/internet/comissao/index/perm/capr/CAPR_BIOABIOVE.pdf>. Acesso em: 16 nov. 2019.

FRANÇA, L. J. **Desenvolvimento e caracterização de emulsões de óleo de babaçu e óleo de mamona para aplicação como fluidos de corte de usinagem**. 2018. 102f. Dissertação (mestrado), Universidade Federal de Pernambuco – Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Recife, 2018.

GAJRANIA, K. K.; RAM, D.; SANKAR, M. R. Biodegradation and hard machining performance comparison of eco-friendly cutting fluid and mineral oil using flood cooling and

minimum quantity cutting fluid techniques. *Journal of Cleaner Production*, v. 165, p.1420-1435, 2017.

GARCIA, E.; NÚÑES, P. Application of the wavelet packet transform to vibration signals for surface roughness monitoring in CNC turning operations. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 98, n. 1, p. 902-919, 2018.

GARCÍA, J.; RUBIO, E.; CAROU, D. Sistemas de refrigeración y lubricación en el mecanizado de aleaciones ligeras. *Universidad Nacional de Educación a Distancia*, 2015.

GENTIL, V. **Corrosão**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007.

GIL, A. C. **Métodos e Técnicas de Pesquisa Social**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

GUO, C. Energy Partition and Cooling During Grinding. *3rd International Machining & Grinding Conference, SME (Society of Manufacturing Engineers)*, p. 1-12. Cincinnati, Ohio, USA, 1999.

HADAD, M.; SHARBATI, A. Thermal Aspects of Environmentally Friendly-MQL Grinding Process, *Procedia CIRP*, v. 40, p. 509–515, 2016.

HAMMES, J. M.; ROSA, A. F. P.; WALKER, E. Otimização do acabamento superficial no torneamento cilíndrico externo de um aço SAE 1045. *GEPROS. Gestão da Produção, Operações e Sistemas*, Bauru, Ano 12, nº 2, abr-jun/2017, p. 138-156.

HANNU, T., SUURONEN, K., AALTO-KORTE, K., ALANKO, K., LUUKKONEN, R., JÄRVELÄ, M., JOLANKI, R., JAAKKOLA, M. Occupational respiratory and skin diseases among Finnish machinists: findings of a large clinical study. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, v. 86, p. 189-197, 2013.

HOSSEINI, T.; SHABGARD, M.; PILEHVARIAN, F. Application of liquid nitrogen and spray mode of biodegradable vegetable cutting fluid with compressed air in order to reduce cutting fluid consumption in turning Inconel 740. *Journal of Cleaner Production*, v. 108, p. 90–103, 2015.

HUBBARD, K.; CALLAHAN, R.; STRONG, S. A standardized model for the evaluation of machining coolant/lubricant costs. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 36, n. 1–2, p. 1–10, 2008.

JAWAHIR, I. S.; BRINKSMEIER, E.; M'SAOUBI, R.; ASPINWALL, D. K.; OUTEIRO, J. C.; MEYER, D.; UMBRELLO, D.; JAYAL, A. D. Surface integrity in material removal processes: Recent advances. *CIRP annals*, v. 60, n. 2, p. 603-626, 2011.

JAWAHIR, I.S.; DILLON JR O.W. Sustainable Manufacturing Processes: New Challenges for Developing Predictive Models and Optimization Techniques. *Proceedings of the 1st International Conference on Sustainable Manufacturing (SM1)*, Montreal, Canada, 2007.

JAYAL, A. D.; BADURDEEN, F.; DILLON JR O. W.; JAWAHIR, I. S. Sustainable manufacturing: Modeling and optimization challenges at the product, process and system levels. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, v. 2, p. 144–152, 2010.

JOHN, J.; BHATTACHARYA, M., RAYNOR, P. C. Emulsions containing vegetable oils for cutting fluid, application. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, v. 237, p. 141-150, 2004.

JULIEB, Z.; ANDRES, F.; KIMF, H.; STEVEN, J. Design of hard water stable emulsifier systems for petroleum and bio-based semi-synthetic metalworking fluids. *Environmental Science & Technology*, v. 37, p. 5278-5288, 2003.

KALPAKJIAN, S.; SCHMID, S. R. **Manufacturing Engineering and Technology**. 6.ed. Califórnia: Prentice Hall, 2010. 320 p.

KATNA, R.; SINGH, K.; AGRAWAL, N.; JAIN, S. Green Manufacturing – Performance of a Biodegradable Cutting Fluid. *Materials and Manufacturing Processes*, v. 32, n. 13, p. 1522-1527, 2017.

KATO, K.; ADACHI, K. Wear Mechanisms. In **Modern Tribology Handbook**. 2 ed. CRC Press, 2001.

KURAM, E.; OZCELIK, B.; BAYRAMOGLU, M.; DEMIRBAS, E.; TOLGA, B. Optimization of cutting fluids and cutting parameters during end milling by using D-optimal design of experiments. *Journal of Cleaner Production*, v. 42, p. 159–166, 2013.

LAWAL, S. A.; CHOUDHURY, I. A.; NUKMAN, Y. Application of vegetable oil-based metalworking fluids in machining ferrous metals - A review. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. v. 52, p. 1 - 12. 2012.

LISBOA, F. C. D.; MORAES, J. J. B. D.; HIRASHITA, M. D. A. Fluidos de corte: uma abordagem geral e novas tendências. *XXXIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção*. p. 1-16, 2013.

LIU, C.; LI, Y.; HUA, J.; LU, N.; MOU, W. Real-time cutting tool state recognition approach based on machining features in NC machining process of complex structural parts. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 97, n. 2, p. 229-241, 2018.

MACHADO, A. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; SILVA, M. B. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. São Paulo: Blucher, 2009.

_____. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2011.

_____. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2015.

MADANCHI, N.; WINTER, M.; HERRMANN, C. Cutting Fluid Drag-out and Exhaust Air in Grinding Processes: Influence on the Ecoefficiency. *Procedia CIRP*, v. 29, p. 329–334, 2015.

MADANHIRE, I.; MBOHWA, C. **Mitigating Environmental Impact of Petroleum Lubricants**. Springer: 2016.

MALKIN, S. *Grinding Technology: Theory and Applications of Machining with Abrasives*. SME (Society of Manufacturing Engineers), 1. ed., p. 275. Dearborn, USA, 1989.

METROHM. Autolab PGSTAT302N. 2021. Disponível em: <<https://www.metrohm.com/pt-br/produtos-geral/eletroquimica/autolab-linha-modular/PGSTAT302N>>. Acesso em: 30 mar. 2021.

MIJANOVIC, K.; SOKOVIC, M. Ecological aspects of the cutting fluids and its influence on quantifiable parameters of the cutting processes. *The Journal of Materials Processing Technology*, v. 109, p. 181–189, 2001.

MORAIS, H. L. O. **Análise da viabilidade e das propriedades físico-químicas de formulações de fluido de corte integral utilizando óleos vegetais e minerais no processo de retificação**. 2014. 137 f. Dissertação (Mestrado), Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

M'SAOUBI, R.; DRAGOS, A.; CHRISTOPHER, H.; MARK, H.; PAUL, S. Surface integrity of nickel-based alloys subjected to severe plastic deformation by abusive drilling. *CIRP Annals*, v. 63, n. 1, p. 61-64, 2014.

MUMMERY, L. **Surface textura analysis - The handbook**. Hommelwerke GmbH, 1992.

NEVES, T. E. S. B. **Investigação da influência da aplicação de óleos vegetais comestíveis como fluido de corte no processo de furação do aço ABNT 1045**. 2013. 209f. Tese (doutorado), Universidade Federal de Uberlândia – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Uberlândia, 2013.

OSAMA, M.; SINGH, A.; WALVEKAR, R.; KHALID, M.; GUPTA, T. C. S. M.; YIN, W. W. Recent developments and performance review of metal working fluids. *Tribology International*, v. 114, p. 389–401, 2017.

OYAFUSO, M. Y.; SILVA, R. H. **Acabamento superficial e análise econômica do torneamento de um aço 1050 com fluidos de corte**. 2018. 45f. Trabalho de conclusão de curso (graduação), Universidade Federal de Uberlândia – Curso de Engenharia de Produção, Ituiutaba, 2018.

PINHO, R. S.; OLIVEIRA, A. F. M.; SILVA, S.I. Potential oilseed crops from the semiarid region of Northeastern Brazil. *Bioresource Technology*, v. 100, n. 23, p. 6114–6117, 2009.

PLAZA, E. G.; LÓPEZ, P. J. N.; GONZÁLEZ, E. M. B. Efficiency of vibration signal feature extraction for surface finish monitoring in CNC machining. *Journal of Manufacturing Processes*, v. 44, p. 145-157, 2019.

PU, Z.; OUTEIRO, J. C.; BATISTA A. C.; DILLON JR O. W.; PULEO D. A.; JAWAHIR, I. S. Enhanced surface integrity of AZ31B Mg alloy by cryogenic machining towards improved functional performance of machined components. *International journal of machine tools and manufacture*, v. 56, p. 17-27, 2012.

PUSAVEC, F.; KRAJNIK, P.; KOPAC, J. Transitioning to sustainable production - Part I: application on machining technologies. *Journal of Cleaner Production*, v. 18, n. 2, p. 174–184, 2010.

RADI, P. A.; SANTOS, L. V.; BONETTI, L. F.; TRAVA-AIROLDI, V. J. Tribologia, conceitos e aplicações. *Anais do XIII ENCITA - Encontro de Iniciação Científica e Pós-Graduação do ITA*. p. 1-14, 2007.

RAYNOR, P. C.; KIM, S. W.; BHATTACHARYA, M. Mist generation from metal working fluids formulated using vegetable oils. *Annals of Occupational Hygiene*, v. 49, p. 283-293, 2005.

RODRIGUEZ, C.E. P., SOUZA, G.F.M. Reliability concepts applied to cutting tool change time. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 95, p. 866-873, 2010.

SAIKIRAN, M.; KUMAR, P. An investigation on the effects of vegetable oil based cutting fluids in the machining of copper alloys. *Materials Today: Proceedings*, v. 19, p. 455-461, 2019.

SAIKIRAN, M.; RAVALI, G.; KUMAR, B. Comparative study of vegetable based and conventional cutting fluids in machining of copper alloys. *Materials Today: Proceedings*. v. 19, p 611-614, 2019.

SANDVIK COROMANT. Informações da pastilha TNMG 16 04 04-QM H13A. 2021. Disponível em:< <https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/products/pages/productdetails.aspx?c=TNMG%2016%2004%2004-QM%20%20%20H13A>>. Acesso em: 05 mai 2021.

SALONITIS, K.; KOLIOS, A. Reliability assessment of cutting tool life based on surrogate approximation methods. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 71, p. 1197-1208, 2014.

SARIKAYA, M.; GÜLLÜ, A. Multi-response optimization of MQL parameters using Taguchi-based GRA in turning of difficult-to-cut alloy Haynes 25. *Journal of Cleaner Production*, v. 91, p. 347-357, 2015.

SHASHIDHARA, Y. M.; JAYARAM, S. R. Vegetable oils as a potential cutting fluid - an evolution, *Tribology International*, v. 43 p. 1073-1081. 2010.

SHOKRANI, A.; DHOKIA, V.; NEWMAN, S. Environmentally conscious machining of difficult-to-machine materials with regard to cutting fluids. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 57, p. 83–101, 2012.

SILVA, E. L.; MENEZES, E. M. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação**. 4. ed. rev. atual. –Florianópolis: UFSC, 2005. 138p.

SILVA, L. F. S.; DUTRA, C. P.; SOUZA, V. B.; FERNANDES, K. C. Estudo da dureza do aço SAE 1045 submetido ao tratamento térmico de têmpera e resfriado em diferentes materiais. *Revista interdisciplinar de pensamento científico*. v.5, p. 169-182 ,2019.

SILVA, S. I.; OLIVEIRA, A. S. M.; NEGRI, G.; SALATINO, A. Seed oils of Euphorbiaceae from the Caatinga, a Brazilian tropical dry forest. *Biomass and Bioenergy*, v. 69, p.124-134, 2014.

SINGH, A. K.; GUPTA, A. K. Metal working fluids from vegetable fluids. *Journal of Synthetic Lubrication*, v. 123, p. 167-176, 2006.

SINIAWSKI, M.T.; SANIEI, N.; ADHIKARI, B.; DOEZEMA, L.A. Influence of fatty acid composition on the tribological performance of two vegetable-based lubricants. *Journal of Synthetic Lubrication*. v. 24, p. 101-110, 2007.

SUN, H.; LIUB, Y.; PAN, J.; ZHANG, J.; JI, W. Enhancing cutting tool sustainability based on remaining useful life prediction. *Journal of Cleaner Production*, v. 244, p. 1-10, 2020.

TAYLOR HOBSON. **User guide: Surtronic S-Series**. 2013. Disponível em: <https://www.taylor-hobson.com/products/surface-profilers/handheld-surtronic/surtronic-s-100-series-surface-roughness-tester>. Acesso em: 30 mar. 2021.

TAZEHKANDI, A. H.; SHABGARD, M.; PILEHVARIAN, F. Application of liquid nitrogen and spray mode of biodegradable vegetable cutting fluid with compressed air in order to reduce cutting fluid consumption in turning Inconel 740. *Journal of Cleaner Production*, v. 108, p. 90-103, 2015.

TESSARO, E. P. **Avaliação de processos oxidativos para o tratamento ambientalmente adequado de fluidos de corte**. 2008. 96f. Dissertação (mestrado), Universidade de São Paulo - Programa de Pós-graduação do Instituto de Química de São Carlos, São Carlos, 2008.

TOMAS, G. L.; ZAGONEL, J.; COLASANTE, L. O.; NOGUEIRA, R. R. Produção do girassol e teor de óleo nos aquênios em função da temperatura do ar, precipitação pluvial e radiação solar. *Ciência Rural*, p. 1380-1385, 2012.

TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. **Metal cutting**. 4. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000.

UMBRELLO, D.; MICARI, F.; JAWAHIR, I. S. The effects of cryogenic cooling on surface integrity in hard machining: A comparison with dry machining. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, v. 61, n. 1, p. 103-106, 2012.

UsiFAB INTM. Apresentação dos equipamentos da plataforma de Usinagem e Fabricação. 2019.

VAGNORIUS, Z.; RAUSAND, M.; SØRBY, K. Determining optimal replacement time for metal cutting tools. *European Journal of Operational Research*, v. 206, p. 407-416, 2010.

WALKER, T. **The MQL Handbook: a guide to machining with minimum quantity lubrication**, Unist, Inc., 2013.

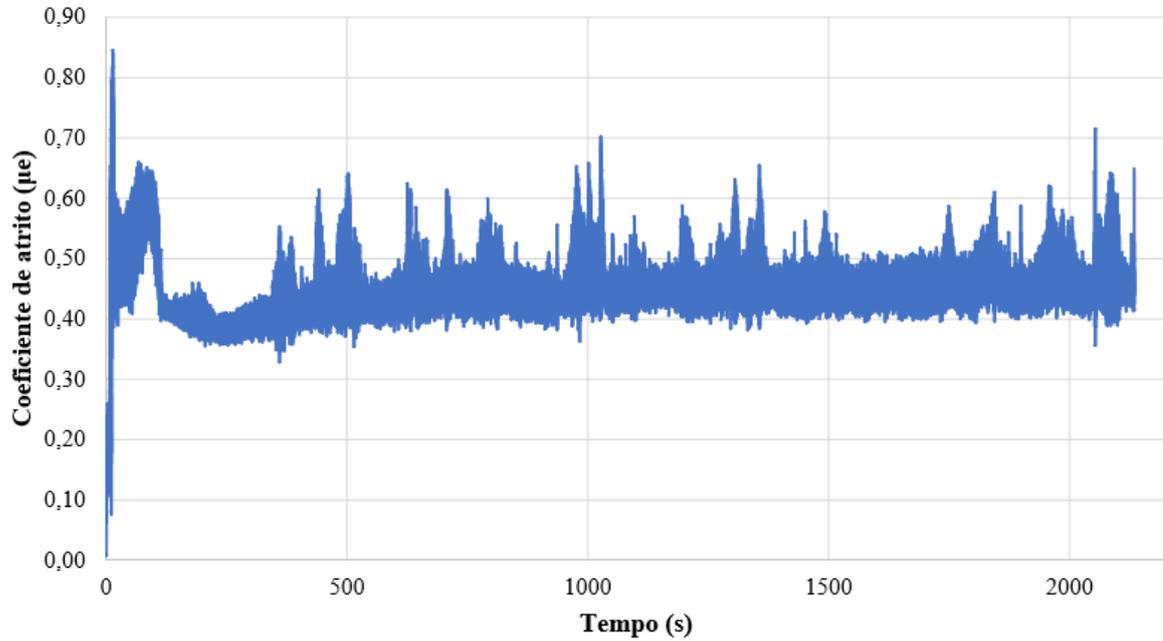
WEINERT, K.; INASAKI, I.; SUTHERLAND, J.W.; WAKABAYASHI, T. Dry machining and minimum quantity lubrication. *CIRP Ann. Manufacturing Technology*. v. 53, p. 511-537, 2004.

WOLYNEC, S. **Técnicas eletroquímicas em corrosão**. São Paulo: EdUSP, 2013.

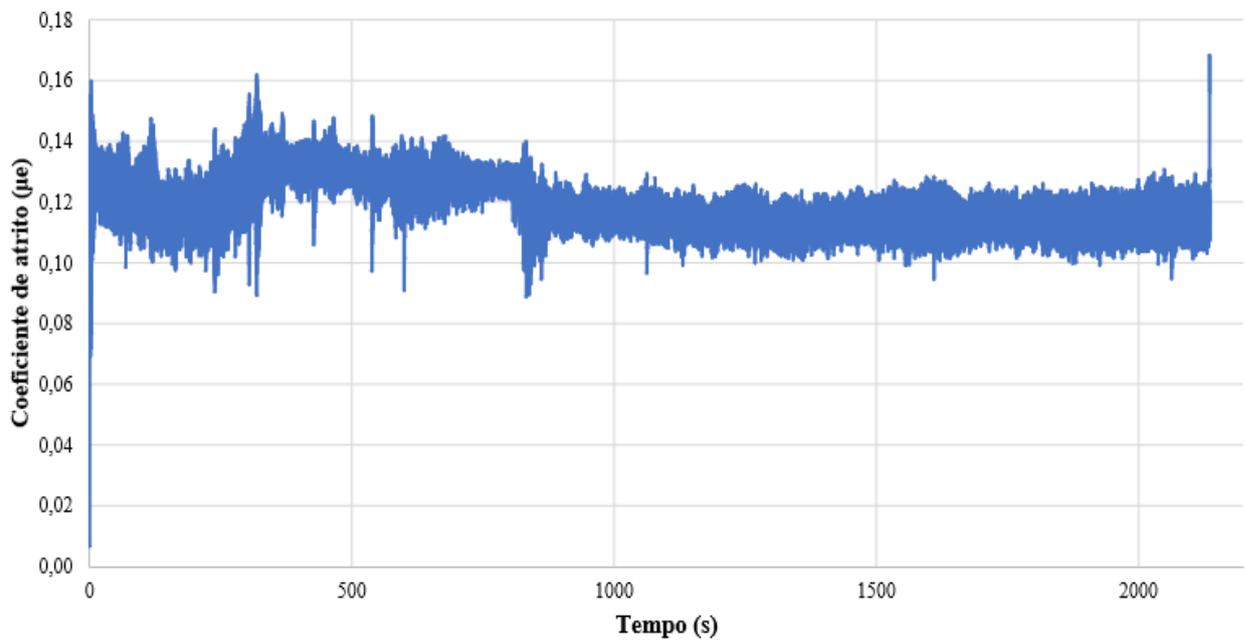
ZHAO, F.; OGALDEZ, J.; SUTHERLAND, J. Quantifying the water inventory of machining processes. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, v. 61, n. 1, p. 67-70, 2012.

APÊNDICE A – CURVAS DE COMPORTAMENTO DO COEFICIENTE DE ATRITO NO ENSAIO DE CONFIGURAÇÃO PINO-DISCO

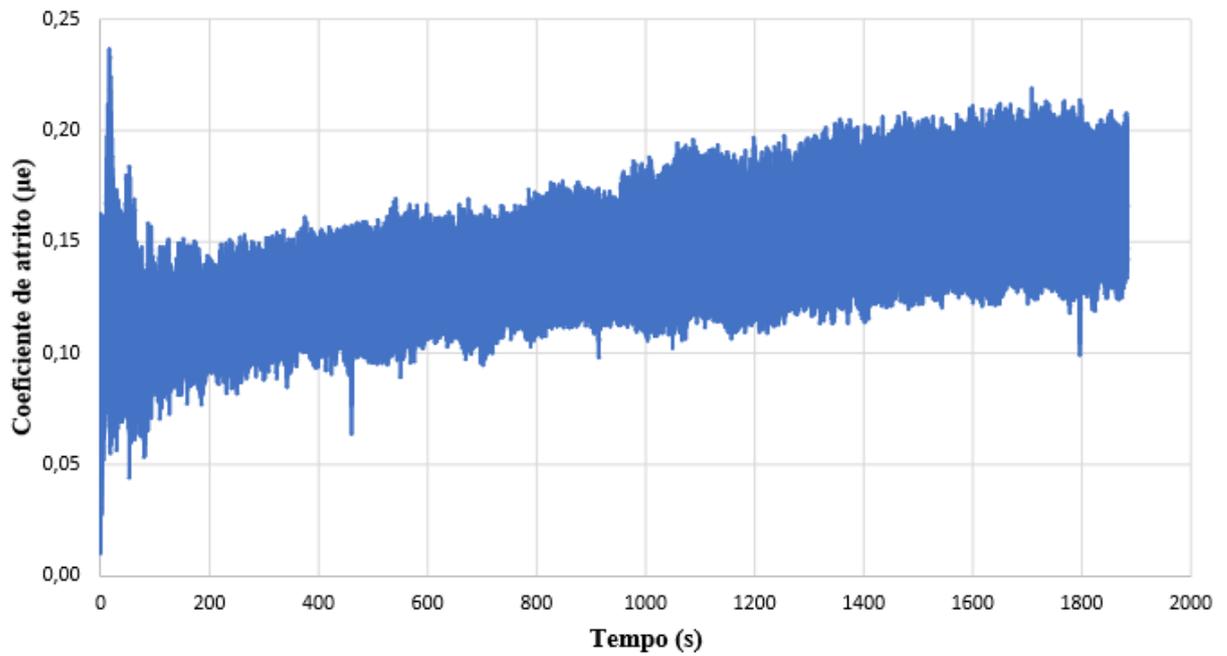
**Comportamento do coeficiente de atrito no ensaio pino (AISI 52100)
- disco (SAE 1045) realizado a seco**



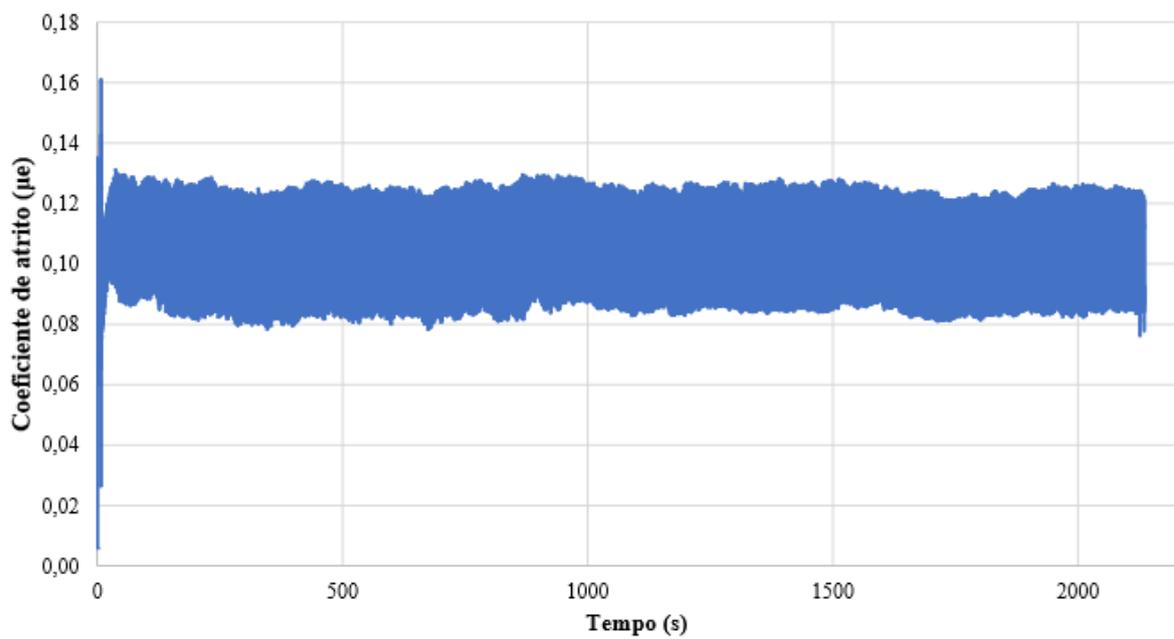
**Comportamento do coeficiente de atrito no ensaio pino (AISI 52100) - disco
(SAE 1045) em emulsão a base de óleo sintético**



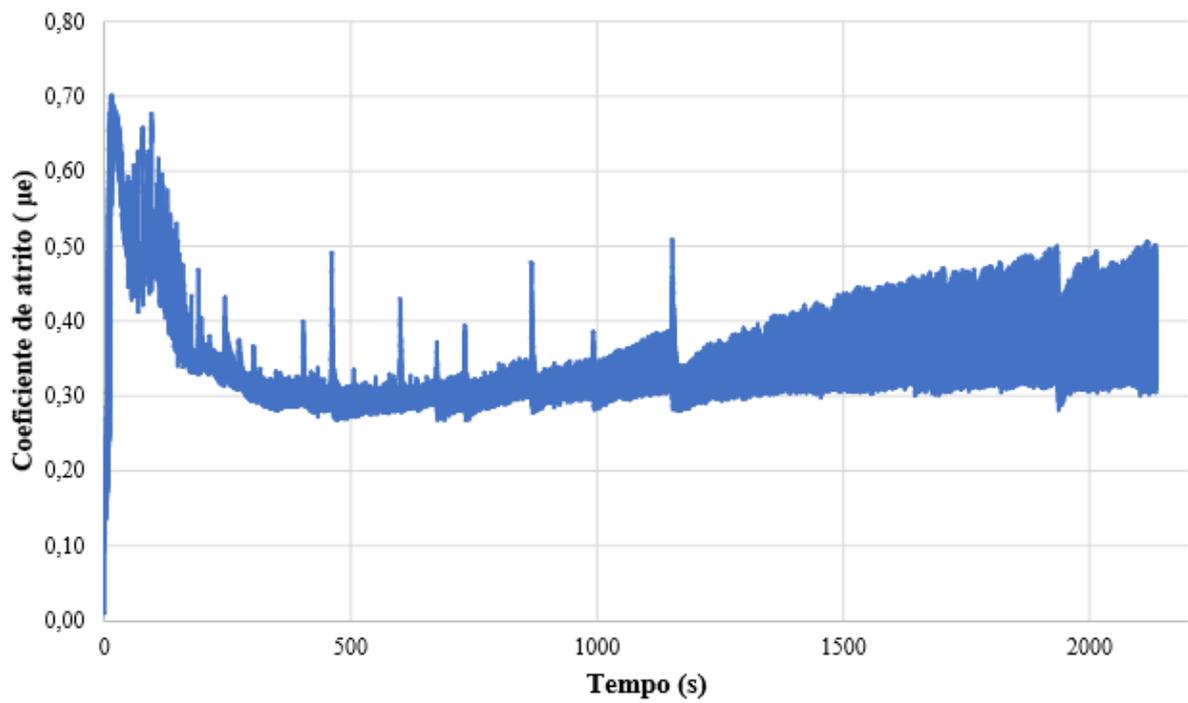
Comportamento do coeficiente de atrito no ensaio pino (AISI 52100) - disco (SAE 1045) em emulsão a base de óleo de mamona



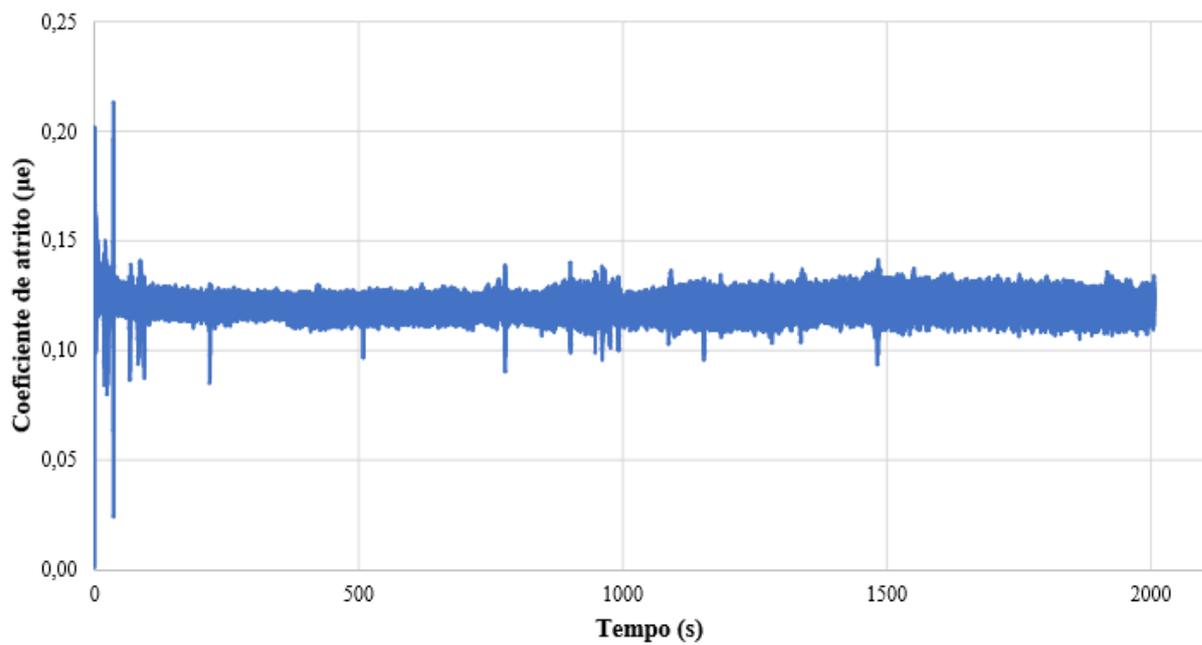
Comportamento do coeficiente de atrito no ensaio pino (52100) - disco (SAE 1045) em emulsão a base de óleo de babaçu



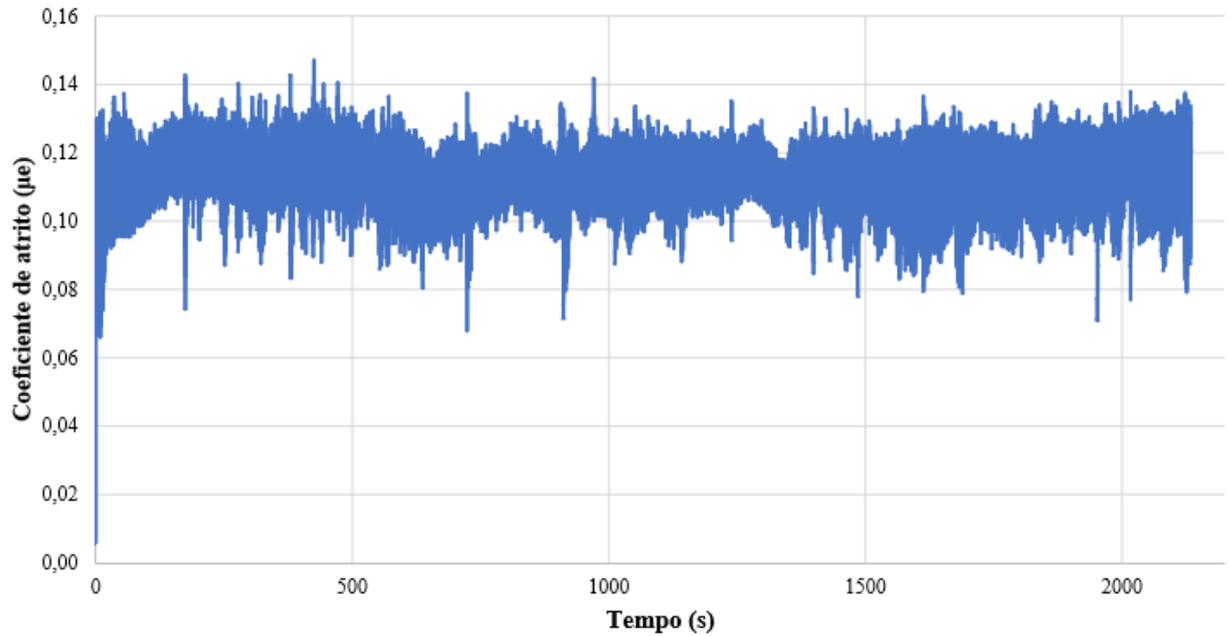
Comportamento do coeficiente de atrito no ensaio pino (metal duro) - disco (SAE 1045) realizado a seco



Comportamento do coeficiente de atrito no ensaio pino (metal duro) - disco (SAE 1045) em emulsão a base de óleo sintético



Comportamento do coeficiente de atrito no ensaio pino (metal duro) - disco (SAE 1045) em emulsão a base de óleo de mamona



Comportamento do coeficiente de atrito no ensaio pino (metal duro) - disco (SAE 1045) em emulsão a base de óleo de babaçu

