

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CÂMPUS CORNÉLIO PROCÓPIO
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA – PPGEM

GENÉSIO LOPES DA SILVA

ANÁLISE DE DESEMPENHO DO ÓLEO DE TUNGUE PARA O
DESENVOLVIMENTO DE UM FLUIDO DE CORTE

DISSERTAÇÃO

CORNÉLIO PROCÓPIO

2017

GENÉSIO LOPES DA SILVA

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DO ÓLEO DE TUNGUE PARA O
DESENVOLVIMENTO DE UM FLUIDO DE CORTE**

Dissertação apresentada como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Área de concentração: Ciência dos Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Elias da Silva Junior.

Co-orientadora: Prof.^a. Dr.^a. Janaina Fracaro de Souza Gonçalves.

CORNÉLIO PROCÓPIO
2017

Dados Internacionais da Catalogação na Publicação

S 586 Silva, Genésio Lopes da

Análise de desempenho do óleo de tungue para o desenvolvimento de um fluido de corte / Genésio Lopes da Silva. – 2017.
157f. : il. color. ; 31 cm.

Orientador: Carlos Elias da Silva Júnior.

Coorientador: Janaina Fracaro de Souza Gonçalves.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Cornélio Procópio, 2017.
Bibliografia: p. 129 - 136.

1. Tribologia. 2. Desgaste mecânico. 3. Lubrificação e lubrificantes. 4. Usinagem. 5. Engenharia Mecânica - Dissertações. I. Silva Júnior, Carlos Elias da, orient. II. Gonçalves, Janaina Fracaro de Souza. III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós- Graduação em Mecânica. IV. Título.

CDD (22. ed.) 620.1

Biblioteca da UTFPR, Câmpus Cornélio Procópio

Bibliotecários/Documentalistas responsáveis:
Simone Fidêncio de Oliveira Guerra-CRB-9/1276
Romeu Righetti de Araujo-CRB-9/1676



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Cornélio Procópio
Programa de Pós-Graduação em Engenharia MECÂNICA



Título da Dissertação Nº 014:

“Análise de Desempenho do Óleo de Tungue para o Desenvolvimento de um Fluido de Corte”.

por

Genésio Lopes Da Silva

Orientador: **Prof. Dr. Carlos Elias Da Silva Junior**

Esta dissertação foi apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA** – Área de Concentração: **Ciências Mecânicas**, linha de pesquisa: **Caracterização dos Materiais Aplicados em Engenharia**, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – PPGEM – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR – Campus Cornélio Procópio, às 10h do dia 28 de março de 2017. O trabalho foi aprovado pela Banca Examinadora, composta pelos professores:

Prof. Dr. Carlos Elias Da Silva Junior
(Orientador – UTFPR-CP)

Profa. Dra. Janaína Fracaro De Souza Gonçalves
(UTFPR-LD)

Prof. Dr. João Roberto Sartori Moreno
(UTFPR-CP)

Prof. Dr. Rogério Akihide Ikegami
(UTFPR-CP)

Prof. Dr. Luiz Eduardo De Ângelo Sanchez
(UNESP-Câmpus Bauru)

Visto da coordenação:

Prof. Dr. Rogério Akihide Ikegami
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica
UTFPR Câmpus Cornélio Procópio

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela vida e oportunidades pelo seu filho Jesus estar sempre ao meu lado guiando meus passos e conduzindo o encontro com pessoas fantásticas. Nenhuma batalha é vencida sozinha. Durante esta luta algumas pessoas estiveram ao meu lado e percorreram este caminho como verdadeiros soldados, incentivando para que eu buscasse a minha vitória e conquistasse meu sonho.

Aos meus pais, Artur e Emília pelo amor, ensinamentos, confiança e o grande incentivo, que me ensinaram os maiores valores que se pode ter na vida e me fez um ser humano íntegro, com caráter, coragem e dignidade para enfrentar as adversidades da vida.

À minha esposa Márcia, (na elaboração de gráficos e formatação) pelo amor, cumplicidade, carinho e grande apoio e meus filhos Filipe e Isabela pela paciência e compreensão durante o período que me dediquei às pesquisas.

Ao Prof. Dr. Carlos Elias da Silva Júnior, meu orientador neste trabalho, pelo companheirismo constante e por ter tido a generosidade de ceder parte do seu tempo e muito de sua sabedoria à correção dos meus equívocos, a sugestão de diversas mudanças e a discussão de certos assuntos; muito obrigado são palavras muito limitadas para expressar meus agradecimentos.

À Prof^a. Dr^a. Janaína Fracaro de Souza Gonçalves, Co-orientadora pelas valiosas discussões e formas de colaboração ao longo do trabalho. Sempre estava à disposição para auxiliar nas análises e discussão dos resultados, mostrando-se muitíssima paciente.

Ao Prof. Dr. Rogério Akihide Ikegami Coordenador do PPGEM-CP.

Ao Prof. Dr. João Roberto Sartori Moreno pelo companheirismo.

Aos colegas André Alonso Ribeiro, Celso Alves Corrêa; Adailton Silva Borges, Vanderlei Malaquias pela colaboração.

A Kamila Pereira Cardoso e Milena Chanes de Souza, do Centro de Competência em Manufatura (CCM), laboratório de pesquisa localizado no Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA) pelo empenho na execução do teste de bancada do óleo de Tungue.

Ao meu líder espiritual Pastor Ronaldo Costa Maia que nas horas difíceis sempre tinha uma palavra de incentivo.

Aos professores Daniel Paulo Ferreira Tania Marchetti, Edson Aparecido Ferreira, Geraldo Batista Serra da ETEC Pedro D´Arcádia Neto pela colaboração na utilização das máquinas operatrizes do laboratório de mecânica.

Ao laboratorista Alexandre José Gonçalves responsável pelo laboratório de Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Câmpus Curitiba.

Ao CNPq pelo aporte financeiro.

RESUMO

SILVA, Genésio L. **Análise de desempenho do óleo de tungue para o desenvolvimento de um fluido de corte.** 2017. 159 f. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2017.

A grande demanda por produtos que causem menores impactos ambiental, tem feito com que muitas empresas reavaliem seus processos. Com isso, um grande número de pesquisas estão sendo realizados a fim de encontrar meios para melhorar e preservar o meio em que vivemos. Os crescentes avanços tecnológicos obtidos na produção e desenvolvimento de novos bens duráveis, como de máquinas-ferramentas, aumentaram a demanda pelos processos de usinagem, aliado a isto, o uso crescente de fluidos de corte tem proporcionado uma busca por produtos com menor grau de impacto ao ecossistema. Os fluidos de base vegetal têm sido cada vez mais utilizados pela indústria, pois, além de poluírem menos, causam menos agressão ao operador e proporcionam uma melhora significativa na vida das ferramentas. Para realização do presente trabalho foram feitas adaptações de sensores de temperaturas em uma máquina simuladora de desgaste do tipo *Reichert Test* que tem como função proporcionar simulações de atritos e desgaste sob condições controladas, onde foram realizados ensaios com óleos vegetal. Os ensaios tribológicos são alternativas iniciais de análise na etapa de desenvolvimento dos fluidos de corte, uma vez que permitem uma maior flexibilidade para alteração da formulação do fluido onde são obtidas informações sobre lubricidade. Foi avaliado o desempenho do fluido de corte emulsionável no processo de fresamento do ferro fundido vermicular. Os resultados dos ensaios tribológicos por meio do *Reichert Test*, foram satisfatórios, de maneira constante e estável. Os ensaios de desgaste, com óleo de Tunge, apresentou rendimentos muito próximo com relação ao de Pinhão manso, e Moringa, tanto no estado in natura como emulsificado. A base vegetal de Tunge apresentou rendimentos inferiores nos ensaios de usinagem, quando comparada com a base vegetal de Pinhão manso. Isto pode ser perfeitamente justificado em razão da base vegetal de Tunge não apresentar aditivos em sua composição. Estes resultados apontam para base vegetal de Tunge a possibilidade de novas alternativas com recursos renováveis para a aplicação no setor metal mecânico.

Palavras-Chave: Tribômetro, Desgaste, Usinabilidade, Biolubrificantes.

ABSTRACT

SILVA, Genésio L. **Performance analysis of tung oil for the development of a cutting fluid.** 2017.159 f. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2017.

The great demand for products that cause lower environmental impacts, has caused many companies to reevaluate their processes. With this, a great number of researches are being carried out in order to find ways to improve and preserve the environment in which we live. The increasing technological advances obtained in the production and development of new durable goods, such as machine tools, have increased the demand for machining processes and, in addition, the increasing use of cutting fluids has provided a search for products with a lower degree of impact To the ecosystem. Vegetable based fluids have been increasingly used by industry because, in addition to polluting less, they cause less aggression to the operator and provide a significant improvement in tool life. For the accomplishment of the present work, adaptations of temperature sensors were made in a Reichert Test type wear simulator, whose function is to provide simulations of friction and wear under controlled conditions, where tests with vegetable oils were carried out. The tribological tests are initial alternatives of analysis in the stage of development of the cutting fluids, since they allow a greater flexibility to change the formulation of the fluid where information on lubricity is obtained. The performance of the emulsifiable cutting fluid in the milling process of vermicular cast iron was evaluated. The results of the tribological tests by means of the Reichert Test were satisfactory, in a constant and stable way. The wear tests, with Tungue oil, presented yields very close to the one of Pinhão manso, and Moringa, both in the in natura state and emulsified. The Tungue vegetable base presented lower yields in the machining tests, when compared to the vegetal base of Jatropha. This can be perfectly justified because the vegetable base of Tungue does not present additives in its composition. These results point to the vegetable base of Tungue the possibility of new alternatives with renewable resources for application in the metalworking sector.

Keywords: Tribometer, Wear, Machinability, Biolubricants.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - (a) pino, (b) anel (<i>Reichert Test</i>).....	17
Figura 2 - Área dos corpos desgastadas a) ensaio com água; b) ensaio com	18
Figura 3 - Desenho esquemático dos quatro modos representativos de desgaste.	25
Figura 4 - Desgaste adesivo em ferramenta de metal duro - superfície.....	26
Figura 5 - Exemplo de desgaste por fadiga superficial, ensaio.....	28
Figura 6 - Mecanismo de desgaste: desgaste corrosivo.	29
Figura 7 - Relação corrosão tempo para um sistema: (a) em que se forma um filme	29
Figura 8 - Detalhe do desgaste corrosivo em	30
Figura 9 - Desgaste por abrasão, ensaio por meio do <i>Reicher Test</i>	31
Figura 10 - Representação esquemática do desgaste abrasivo: (a) abrasão	33
Figura 11 - Mecanismos envolvidos em desgaste triboquímico.	35
Figura 12 - (a) representa o pino (b) anel.....	37
Figura 13 - Formas do grafite nos ferros fundidos.....	39
Figura 14 - Representação esquemática da cunha de corte.	41
Figura 15 - Fresa multiarestas para faceamento	42
Figura 16 - Formas de desgaste: (a) de flanco; (b) de cratera; (c) de entalhe.	44
Figura 17 - Principais parâmetros utilizados para quantificar os três tipos	46
Figura 18 - Evolução do desgaste da ferramenta em função	47
Figura 19 - Dispositivo para aplicação	49
Figura 20 - Esquema de alinhamento das moléculas: (a) óleos vegetais; (b)	51
Figura 21 - (a) árvore da moringa com vagens; (b) sementes secas.....	53
Figura 22 - Área de desgaste após ensaios com Água, Moringa e.....	54
Figura 23 - (a) Frutos verdes; (b) Frutos secos do Pinhão Manso.	55
Figura 24 - Fruto do Tungue: (a) ramos e frutos (b) frutos e sementes.....	57
Figura 25 - Ácido cis, trans, trans, 9, 11, 13, octadecatrienóico.	58
Figura 26 - Sequência para o desenvolvimento de fluido de corte	62
Figura 27 - Conjunto montado com adaptações de termopares para.....	67
Figura 28 - Sequência de Ensaio Tribológico de <i>Reichert</i>	69
Figura 29 - Região do pino onde sofreu desgaste,	71
Figura 30 - Representação esquemática da sequência dos ensaios	72
Figura 31 - Dimensões do corpo de provas utilizado nos ensaios	73
Figura 32 - Centro de usinagem CNC Romi-D - 600 utilizado nos ensaios	74
Figura 33 - inserto de metal duro 490R-08T308M-KM.....	75
Figura 34 - Informações técnicas do rugosímetro.....	78
Figura 35 - Pontos de medição da rugosidade superficial.	78
Figura 36 - Esquema da captação do consumo de potência.	79
Figura 37 - Médias das áreas das elipse dos pinos para os três fluidos – ensaio	82
Figura 38 - Médias das perda de massa dos pinos para os três fluidos - ensaio.....	83
Figura 39 - Médias das temperaturas dos corpos de provas para.....	84
Figura 40 - Médias das temperaturas dos fluidos para os três fluidos - ensaio.....	85
Figura 41 - Médias das áreas das elipses dos pinos para as emulsões de	87
Figura 42 - Comparação das áreas das elipses dos CPs: (a) Tungue in natura e emulsão.....	87
Figura 43 - Médias das perdas de massa dos pinos para as emulsões de	88
Figura 44 - Comparação das Perdas de massa: (a) Tungue in natura e emulsão de	89
Figura 45 - Temperaturas médias dos pinos para as emulsões de Tungue	90
Figura 46 - Comparação das temperaturas dos CPs: (a) Tungue in natura e	91
Figura 47 - Médias das temperaturas dos fluidos para as emulsões de Tungue.....	92
Figura 48 - Comparação das temperaturas dos fluidos: (a) Tungue in natura e.....	93
Figura 49 - Imagens da região de desgaste nos ensaios com Água: (a) superfície.....	94
Figura 50 - Imagens da superfície do anel, região de adesão de material do pino	94
Figura 51 - Imagens da região de desgaste nos ensaios com óleo de Tungue	95
Figura 52 - Imagens da superfície do anel, região de adesão de material do pino	96
Figura 53 - Imagens da região de desgaste nos ensaios com Pinhão manso	97
Figura 54 - Imagens da superfície do anel, região de adesão de material do pino	98
Figura 55 - Imagens da região de desgaste nos ensaios com óleo de Tungue	99
Figura 56 - Imagens da superfície do anel, região de adesão de material do pino	100

Figura 57 - Imagens da região de desgaste nos ensaios com emulsão de Pinhão	101
Figura 58 - Imagens da superfície do anel, região de adesão de material do pino	102
Figura 59 - a) Ferramenta com desgaste de flanco usada nos ensaios; b)	105
Figura 60 - Evolução do desgaste da ferramenta.	106
Figura 61 - Evolução do desgaste da ferramenta.	107
Figura 62 - Evolução do desgaste da ferramenta.	108
Figura 63 - Análise da composição EDX; superfície de saída. (a) terceiro intervalo de	110
Figura 64 - Análise da composição EDX; desgaste de flanco; (a) terceiro intervalo de	111
Figura 65 - Análise da composição EDX; superfície de saída. (a) terceiro intervalo de	112
Figura 66 - Análise da composição EDX; desgaste de flanco. (a) terceiro intervalo de	113
Figura 67 - Análise da composição EDX: (a) análise da composição química em	115
Figura 68 - Análise da composição EDX; (a) análise da composição química em porcentagem	116
Figura 69 - Imagens em MEV: (a) cavaco usinado com fluido de corte utilizando Pinhão	117
Figura 70 - Rugosidade superficial medida a cada intervalo de 0,72 m de material	119
Figura 71 - Rugosidade superficial medida a cada intervalo de 0,72 m de material	120
Figura 72 - Rugosidade superficial medido a cada intervalo de 0,72 m de material.....	121
Figura 73 - Consumo de potência adquirido a cada intervalo de 0,72 m de.....	123
Figura 74 - Consumo de potência adquirido a cada intervalo de 0,72 m de.....	124
Figura 75 - Consumo de potência adquirido a cada intervalo de 0,72 m de material	125

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades mecânicas e físicas dos ferros fundidos cinzento,	40
Tabela 2 - Características físico-químicas dos óleos de pinhão manso, moringa e.....	58
Tabela 3 - Propriedades mecânicas dos ferro fundido vermicular (CGI).....	73
Tabela 4 - Especificações técnicas da máquina-ferramenta, ROMI - D600.....	74
Tabela 5 - Propriedades físico-químicas das bases vegetais utilizado nos ensaios de usinagem.....	76
Tabela 6 - Parâmetros de corte utilizados nos ensaios com o ferro fundido (CGI).....	77
Tabela 7 - Precisão do Instrumento de Energia e Transdutor.....	79
Tabela 8 - Média das áreas (mm ²) da elipse dos pinos.	81
Tabela 9 - Média das perdas de massa (g) para os pinos.	82
Tabela 10 - Temperatura média (°C) dos corpos de provas.....	83
Tabela 11 - Médias das temperatura (°C) dos fluidos.	84
Tabela 12 - Média das áreas da elipse (mm ²) dos pinos.....	86
Tabela 13 - Médias das perdas de massa (g) dos pinos.....	88
Tabela 14 - Médias das temperaturas (°C) dos CPs para os pinos.	89
Tabela 15 - Médias das temperatura (°C) dos fluidos para os pinos.	91

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
a_p	Profundidade de Usinagem
ASM	American Society for Metals.
ASTM	American Society for Testing and Materials
C	Carbono
CGI	Compacted Graphite Iron
CNC	Comando Numérico Computadorizado
Cr	Cromo
DIN	Instituto Alemão de Normas
EDX	Energy Dispersive X-ray
EMBRAER	Empresa Brasileira de Aeronáutica
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Fe	Ferro
Fe-C	Ferro Carbono
Fe-C-Si	Ferro Carbono Silício
f_z	Avanço por dente
HRC	Dureza Rockwell C
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ISO	International Organization for Standardization
ITA	Instituto Tecnológico de Aeronáutica
L	Comprimento da Amostragem da Rugosidade
KT	Profundidade da cratera
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
min.	Minuto
Mn	Manganês
MQL	Mínima Quantidade de Lubrificante
NBR	Norma Brasileira
P	Fósforo
PNB	Produto Nacional Bruto
R	Raio
R_a	Rugosidade média

RPM	Rotação por Minuto
R_t	Rugosidade total
R_z	Rugosidade de profundidade média
S	Enxofre
Si	Silício
Sn	Estanho
Ti	Titânio
TiN	Nitreto de titânio
VB_B	Desgaste de flanco médio;
$VB_B^{máx}$	Desgaste de flanco máximo;
VB_N	Desgaste de entalhe.
V_c	Velocidade de corte
V_f	Velocidade de avanço
W	Tungstênio
WC	Carboneto de Tungstênio
Zr	Zircônio
μm	Micrômetro
λ_c	<i>cut off</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 OBJETIVOS	19
1.2 Objetivo Geral	19
1.3 Objetivos Específicos	20
1.4 JUSTIFICATIVA	20
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1 Tribologia	22
2.1.1 Teoria do Desgaste	23
2.1.2 Mecanismos de Desgaste	24
2.1.3 Desgaste Adesivo	25
2.1.4 Desgaste por Fadiga	27
2.1.5 Desgaste Corrosivo	28
2.1.6 Desgaste por Abrasão	30
2.1.7 Desgaste Abrasivo de Dois Corpos	32
2.1.7.1 Desgaste Abrasivo de Três Corpos	33
2.2 Reações Triboquímicas	34
2.3 Comportamento Tribológico	35
2.4 Ferro Fundido	37
2.4.1 Ferro Fundido CGI	38
2.4.2 Usinabilidade do Ferro Fundido CGI	40
2.5 Usinagem por Fresamento	42
2.5.1 Formas de Desgaste em Ferramentas de Corte	43
2.5.2 Critérios de Fim de Vida da Ferramenta	45
2.6 Fluidos de Corte	47
2.6.1 Fluido de Corte de Base Vegetal	50
2.6.2 Estudos de Óleos Vegetais para Possíveis Aplicações como Lubrificantes	52
2.6.3 Desenvolvimentos de um Fluido de Corte de Base Vegetal	61
2.6.4 Seleção do Óleo de Base Vegetal	63
2.6.5 Demanda de Mercado e Potencial de Produção	64
2.6.6 Base Vegetal Seleccionada	64
2.7 Ensaio Tribológicos	64
2.7.1 Validação do Fluido de Corte	65
3 MATERIAIS E MÉTODOS	66
3.1 Construção e Adaptação de um Tribômetro do Tipo <i>Reichert Test</i>	66
3.2 Experimento Tribológico	67
3.3 Testes de Usinabilidade	72
3.3.1 Corpo de Provas para os Ensaio	73
3.3.2 Máquina-Ferramenta	74
3.3.3 Ferramentas de Corte	75
3.3.4 Fluidos de Corte	76
3.3.5 Parâmetros de Corte	77
3.3.6 Monitoramento da Rugosidade Superficial	77
3.3.7 Aquisição de Potência Consumida	78
3.3.8 Monitoramento do Desgaste da Ferramenta	79
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	81
4.1 Ensaio Realizados com Óleos de Base Vegetal In natura	81
4.2 Ensaio com Óleos de Base Vegetal Emulsificados	85
4.3 Mecanismos de Desgaste Tribológico - Fluidos In natura	93
4.3.1 Mecanismos de Desgaste Tribológico - Fluidos Emulsificados	98
4.3.2 Discussão dos Ensaio Tribológicos	102
4.4 Resultados dos Ensaio de Usinagem - Base Vegetal Emulsificado	104
4.4.1 Desgaste de Ferramenta	104
4.4.2 Mecanismos de Desgaste	108
4.4.3 Análise EDX da Superfície dos Corpos de Prova	114
4.4.4 Análise de Cavaco	116

4.4.5 Rugosidade Superficial	117
4.4.6 Consumo de Potência.....	122
5 CONCLUSÕES.....	126
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	128
REFERÊNCIAS.....	129
APÊNDICE A	137

1 INTRODUÇÃO

O termo tribologia, origina-se do grego Τριβο (Tribo - esfregar) e Λογος (Logos - estudo) foi utilizado, oficialmente, pela primeira vez em 1966 em um relatório feito por H. Peter Jost para o Comitê do Departamento Inglês de Educação e Ciência. Neste relatório, o termo foi definido como a “Ciência e Tecnologia de superfícies interativas em movimento relativo e dos assuntos e práticas relacionados” (JOST, 1990).

O homem desde os tempos primórdios já se preocupava em reduzir o atrito, um exemplo que ilustra bem esta afirmação é a invenção da roda que reduz o atrito nos movimentos de rotação e de translação sendo um invento tribológico anterior a outros registros históricos.

A necessidade de envolvimento do homem com fenômenos tribológicos e de desgaste é perfeitamente justificável, pois esses fenômenos afetam quase todos os aspectos da vida não ficando restrito aos elementos de máquinas.

A ação de movimento das articulações humanas constitui uma situação tribológica e a cura de doenças como coxartrose, artroplastia do quadril, substituição da articulação relacionadas. A construção de próteses é devida, em grande parte, ao conhecimento dos tribologistas (ALTERA, 2009).

Para a indústria, o desgaste excessivo de componentes mecânicos é um dos fatores de maior preocupação, pois a quebra dos mesmos pode causar transtornos no processo fabril e conseqüentemente elevar os custos de manutenção e produção. Deste modo, adquirir conhecimentos apenas em processos de fabricação não é suficiente, visto que há também a necessidade de se estudar e entender os processos de desgaste que ocorrem nos sistemas e os meios de prevenção dos mesmos. Portanto, o estudo do atrito e do desgaste é essencial para engenharia, no qual é possível obter informações que auxiliam na elaboração de projetos, no desenvolvimento de materiais e de métodos de controle de qualidade dos elementos em operação.

Os ensaios tribológicos são alternativas iniciais de análise na etapa de desenvolvimento dos produtos de fluidos de corte, uma vez que permitem uma maior flexibilidade para alteração da formulação onde são obtidas informações sobre lubrificidade dos mesmos na fase de teste (GONÇALVES, 2013).

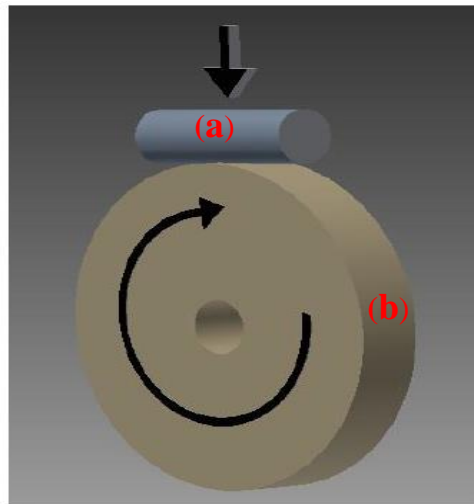
Um equipamento muito utilizado no estudo desses fenômenos são os tribômetros, que são dispositivos que tem como principal função simular situações de atrito e desgaste sob condições controladas. Ensaios de desgastes por meio de tribômetros são de suma importância,

pois é possível simular uma situação de degradação que ocorreria em um equipamento durante um longo período de utilização, em um tempo relativamente curto (ALVES, 2014).

Muitos são os tipos de tribômetro, quando selecionado adequadamente pode simular várias características de um problema de desgaste ou atrito, sem os transtornos associados à experimentação em equipamento real. Os critérios na seleção de um tribômetro devem ser muito bem fundamentado, pois um equipamento mal selecionado pode fornecer resultado inteiramente duvidoso.

O ensaio tribológico utilizado neste trabalho é o *Reichert Test*, especificado pela norma DIN 50-347 (aparato para ensaios de desgaste) devido à maior repetibilidade dos resultados.

Este método consiste em uma configuração para o tribômetro do tipo pino sobre um anel, utilizado para testar a capacidade de resistência da película lubrificante sob a aplicação de uma força cisalhante. Este conjunto a ser ensaiado, fica imerso em óleo. O número constante de rotações por minuto (RPM) do eixo árvore deve arrastar um filme de óleo e garantir o fluxo de lubrificante no ponto de contato. Os materiais do pino e do anel variam conforme o material a ser testado. Figura 1 o pino (a) simula o material da peça a ser usinada e o anel (b) simula a ferramenta de corte (GONÇALVES, 2013).



**Figura 1 - (a) pino; (b) anel (*Reichert Test*).
Fonte: Alves (2014).**

Para o desenvolvimento de um projeto de obtenção de um novo fluido de corte é relevante entender os processos triboquímicos e tribofísicos que ocorrem entre o material e a ferramenta de corte, além de ter compreensão dos elementos que influenciam nos processos de

usinagem, que ajudarão na avaliação dos fenômenos físico-químicos que ocorrem quando dois corpos estão em contato deslizante (GONÇALVES, 2013).

Para o desenvolvimento, formulação e teste de bancada do fluido de corte de base vegetal, por meio de uma parceria com pesquisadores do Departamento de Química do Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA). Serão avaliados os aditivos e componentes que, em combinação com o óleo vegetal, poderão contribuir para o bom desempenho do produto em operação de usinagem por fresamento. O ensaio tribológico será feita de modo a comparar o óleo de tungue com os óleos in natura de pinhão manso, moringa e água; resultados preliminares obtidos por meio do *Reichert Test* estudado pelo grupo de pesquisa (CARDOSO, 2012; SOUZA et al., 2012; GONÇALVES, 2013; RODRIGUES et al., 2013).

A figura 2 mostra as áreas desgastadas dos corpos de provas, ensaiados com óleo de moringa, amendoim, água e a seco.

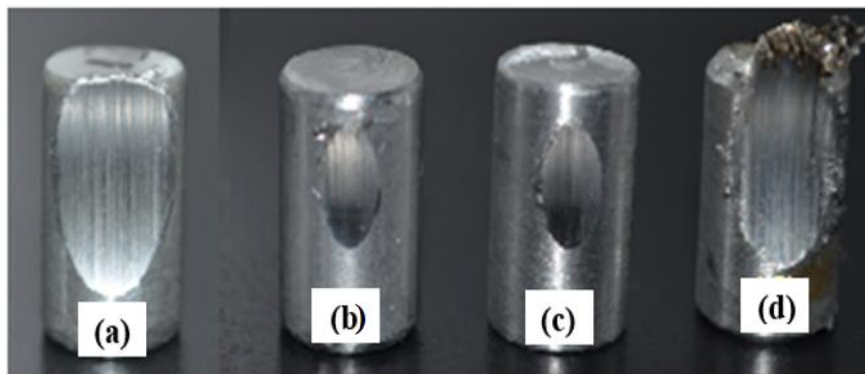


Figura 2 - Área dos corpos desgastadas: (a) ensaio com água; (b) ensaio com óleo de moringa; (c) ensaio com óleo de amendoim; (d) ensaio a seco.
Fonte: Gonçalves et al. (2014).

Fluidos de base vegetal apresentam cadeias carbônicas longas e os ácidos graxos insaturados proporcionando a formação de um biofilme mais estável e capaz de dar proteção ao sistema peça-ferramenta de corte, quando comparado a um óleo mineral (SOUZA et al., 2014).

Com foco em fatores sustentáveis, devido à multiplicidade dos efeitos negativos gerados pela utilização dos fluidos de corte, tais como danos à peça, ao meio ambiente e agressão à saúde do operador, especial atenção está sendo voltada à seleção eficiente de tais fluidos, por garantir menores impactos ao meio ambiente (GOMES et al., 2008).

A busca por novas bases para óleos lubrificantes, por produtos que sejam menos agressivos ao meio ambiente que os óleos minerais, de modo a reduzir a dependência de produtos de origem fósseis, tornou-se uma busca incansável.

As plantas oleaginosas possuem um grande potencial para essa substituição. Entre as culturas oleaginosas, o pinhão manso, tungue e moringa é uma alternativa de grande potencial de produção de óleos vegetais e também por ser oriunda de clima temperado, sendo adaptada às condições edafoclimáticas, além disso, é uma cultura que não faz parte de cadeia alimentar humana ou animal, a sua produção tem como base a agricultura familiar e pequenas cooperativas e ainda apresenta elevado rendimento para extração de óleo.

O presente estudo busca informações sobre o potencial de uso de óleos vegetais de tungue pinhão manso e moringa para uma possível aplicação em processos de usinagem.

Inicialmente, investigou-se o comportamento tribológico, posteriormente a aplicação e validação dos óleos vegetais para o desenvolvimento como fluido de corte.

1.1 OBJETIVOS

Os objetivos que norteiam o presente trabalho estão divididos em objetivo geral e específicos, definidos como segue.

1.2 Objetivo Geral

O presente trabalho tem por objetivo buscar maiores informações sobre o potencial de lubrificação dos óleo de moringa, tungue e pinhão manso para o setor metalmeccânica, visando adquirir maiores conhecimentos. Para isso será utilizado teste tribológico por meio do *Reichert Test* na seleção de óleos vegetais para possível aplicação como fluido de corte para indústria metalmeccânica.

1.3 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos desse trabalho são:

- Adaptação de sensores para aquisição de temperaturas em um simulador de desgaste do tipo *Reichert Test* para realizar ensaios de desgaste utilizando óleos de base vegetal.
- Avaliar o poder de lubrificação dos óleos de base vegetal, para estudar a viabilidade de seguir para outras etapas de desenvolvimento de novas formulações de lubrificantes.
- Analisar os desgastes ocorridos nos corpos de provas por meio da avaliação de suas perdas de massa, área da elipse, análises das imagens por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV).
- Avaliar entre os óleos testados, a sua capacidade de lubrificação.
- Avaliar o desempenho do fluido em um processo de fresamento para possível aplicação em processos de usinagem.

1.4 JUSTIFICATIVA

Observa-se, atualmente, um grande esforço mundial para a redução da dependência dos produtos derivados de petróleo, a fim de minimizar o seu impacto sobre o meio ambiente, as discussões sobre questões ambientais. Contudo, nos últimos anos a comunidade científica busca uma solução alternativa à fonte esgotável que é o petróleo para uso na indústria metalmeccânica, fazendo com que as discussões sobre questões ambientais inseridas no amplo conceito de desenvolvimento sustentável, ganhem intensidade cada vez maior. Mais do que um novo conceito, o desenvolvimento sustentável é um processo de mudança, na qual a exploração dos recursos, a orientação dos investimentos, em direção ao desenvolvimento sustentável e a mudança institucional devem levar em consideração as necessidades das futuras gerações. Isto impõe um novo desafio tecnológico aos pesquisadores e engenheiros e aumenta a importância dos processos menos agressivos, como um fator competitivo (ERHAN et al., 2008).

O Brasil possui um grande potencial de produção de óleo vegetal, capaz de contribuir com boa parte da alimentação mundial e ainda produzir energia. O óleo pode ser extraído de diversas espécies de plantas que crescem em diferentes condições ambientais e solos. A diversidade de plantas oleaginosas é enorme, representadas por várias espécies; a moringa, pinhão manso e tungue é uma dentre muitas outras.

O desenvolvimento de um fluido de corte de base vegetal, se justifica em razão do escasso material técnico sobre a aplicação dos óleos moringa, pinhão manso e de tungue na indústria metalmeccânica, disponível na bibliografia.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentado o levantamento do estado da arte referente à Tribologia. Inicialmente, são abordados os conceitos fundamentais da Tribologia, seguido de uma discussão dos principais indicadores que influenciam o atrito e os principais mecanismos de desgaste. Posteriormente, são apresentados estudos sobre o comportamento dos ferro fundidos e os principais mecanismos de desgaste que atuam em processos de usinagem. São também abordados a utilização de fluidos de corte e alternativas que causam menos impactos ambientais.

2.1 Tribologia

Tribologia é definida como a ciência e tecnologia da interação entre superfícies em movimento relativo e das práticas relacionadas. Tribologia envolve a investigação científica de todos os tipos de fricção, lubrificação e desgaste e também as aplicações técnicas do conhecimento tribológico (GAHR, 1987).

Uma rápida pesquisa pelos dicionários da Língua Portuguesa sobre a palavra “desgastar” resulta nas seguintes expressões: gastar aos poucos; gastar pelo uso. Todas compartilham a visão de que, se o componente (des) gasta, há perda.

A necessidade do envolvimento do homem com problemas tribológico e de desgaste é perfeitamente justificável, pois esses fenômenos afetam quase todos os aspectos da vida humana, não ficando restritos apenas às máquinas utilizadas e a seus mancais.

A ação de movimentos das articulações humanas é uma situação tribológica; a cura de doenças como a artrite e a construção de próteses são devidas em grande parte ao conhecimento dos tribologistas (ALTERA, 2009).

Desgaste é a perda progressiva de matéria da superfície de um corpo sólido, devido ao contato e movimento relativo com outro corpo sólido, líquido ou gasoso.

O tipo, a evolução e a extensão do desgaste são determinados pelos materiais dos componentes em contato e pelos seus graus de acabamentos, por eventuais materiais intermediários, por influências da área adjacente e pelas condições de operação (BHUSHAN, 2002).

Jost em 1966 na Inglaterra, utilizado, oficialmente, pela primeira vez em um relatório feito para o comitê do departamento inglês de educação e ciência. Neste relatório, o termo foi definido como a “ciência e tecnologia de superfícies interativas em movimento relativo e dos assuntos e práticas relacionados” (SINATORA, 2005).

Segundo Stachowiak (2001), o custo que é gerado por deficiências tribológicas em qualquer economia é causado por uma grande quantidade de energia e materiais que são perdidos nos mecanismos das máquinas quando em operação.

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. O que unifica a tribologia não são os conhecimentos básicos, mas sim a área de aplicação. Assim como os campos dos conhecimentos que formam a tribologia, os estudos dos fenômenos de lubrificação, atrito e desgaste antecedem muito a 1966 (SINATORA, 2005).

A avaliação da aplicabilidade dos materiais, normalmente passa pela avaliação de suas propriedades mecânicas e sua interação com o meio onde atuará. No entanto, com o avanço da engenharia preditiva, busca-se cada vez mais se caracterizar as propriedades tribológicas dos materiais para que a predição da vida útil de cada componente em serviço seja mais assertiva.

Diferentemente das propriedades mecânicas e térmicas, as propriedades tribológicas dos materiais dependem do sistema em que estão inseridos (SUSKI, 2004).

Ainda que os ensaios tribológicos padronizados em pequena escala sejam preferidos por sua praticidade e capacidade de seleção de materiais, os ensaios em escala real são necessários para confirmação dos resultados obtidos em pequena escala (BRISCOE e SINHA, 2009).

2.1.1 Teoria do Desgaste

Desgaste é a perda progressiva de substância de uma superfície que ocorre no nível topográfico e microestrutural, ou ambos, com perda ou ganho de material em uma camada da superfície, ou apenas quando ocorre deformação plástica e conseqüentemente, mudança de forma (KAHR, 1987).

O desgaste é a principal causa da deteriorização dos componentes de máquinas devido à fadiga superficial do material. Ele raramente é catastrófico, porém reduz a eficiência da

operação, podendo resultar em mudanças dimensionais dos componentes ou danos na superfície, que podem gerar problemas secundários como vibrações e desalinhamentos. (SUSKI, 2004).

Desgaste ocorre como consequência natural de um movimento relativo entre superfícies em contato. Muitos mecanismos podem estar envolvidos no desgaste, separadamente ou ao mesmo tempo, principalmente para os metais. Apesar do fato dos mecanismos de desgaste serem, individualmente, bem conhecidos, o fenômeno permanece um tanto quanto imprevisível em termos quantitativos (ALVES, 2014).

Segundo Halling (1975) existem várias formas para descrever o desgaste, esse fenômeno ocorre como consequência natural quando duas superfícies com um movimento relativo interagem uma com outra.

Bayer (2002) relata que o desgaste não se limita apenas à perda de materiais de uma superfície, pode ser definida também pelo movimento do material sem perda de massa, ou seja, alterações na sua geometria como resultado de uma deformação plástica.

Um dos grandes desafios em resolver os problemas de desgaste é antecipar a forma e a intensidade com a qual ele irá ocorrer em um dado componente. Identificar a intensidade do fenômeno, permite à engenharia verificar se o componente poderá atingir a vida útil que se espera para o mesmo. Conhecer a forma como ocorre o desgaste é possível selecionar adequadamente o material para cada aplicação uma vez que o fenômeno de desgaste depende não apenas do material como também do sistema no qual ele ocorre (LEITE, 2009).

2.1.2 Mecanismos de Desgaste

Existem diversas formas para descrever o desgaste. Ludema (1996), por exemplo, cita mais de 30 termos referentes a esse fenômeno. Porém, alguns autores como Rabinowicz (1995), descreveram o desgaste em quatro formas principais: desgaste abrasivo, adesivo, corrosivo e por fadiga, além de alguns processos paralelos que muitas vezes são classificados como formas de desgaste e que em muitas ocasiões, uma das formas de desgaste afeta outras.

Cada processo de desgaste obedece as suas próprias leis e, em muitas ocasiões, um dos modos de desgaste atua de tal modo que influencia os outros. A norma DIN 50320 (Análise de Sistemas de processos de desgaste 1979) cita quatro mecanismos de desgaste: adesão, abrasão, erosão e reações triboquímicas (corrosão-desgaste).

Segundo Kato e Adachi (2001) os modos de desgaste podem ocorrer através de diversos mecanismos. Os mecanismos de desgaste são descritos pela consideração de mudanças complexas na superfície durante o movimento. Em geral, o desgaste ocorre através de vários modos, portanto a compreensão de cada mecanismo de desgaste em cada forma se torna importante. A Figura 3 mostra um breve resumo destes mecanismos.

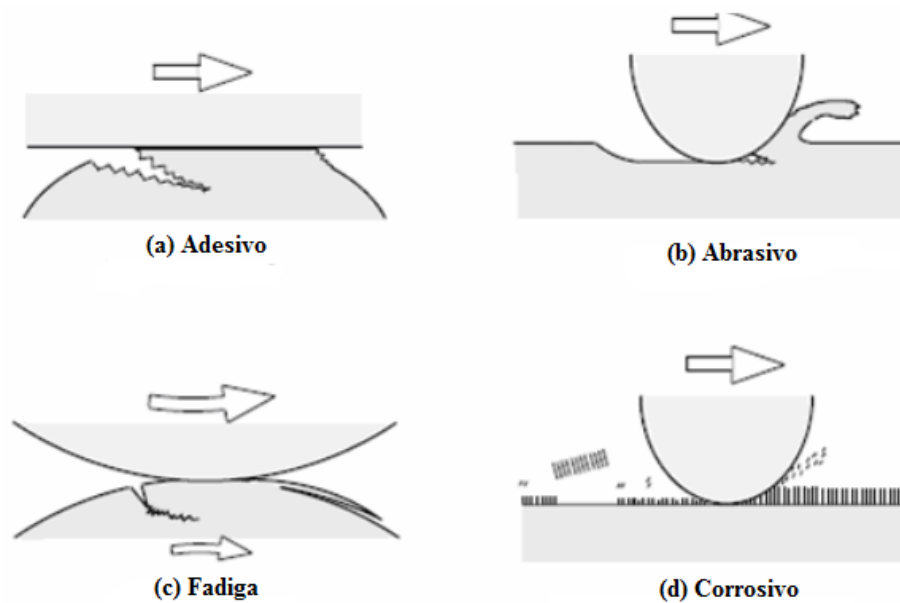


Figura 3 - Desenho esquemático dos quatro modos representativos de desgaste. Fonte: Kato e Adachi (2001).

2.1.3 Desgaste Adesivo

O desgaste adesivo é um fenômeno que ocorre quando duas superfícies são pressionadas uma contra a outra, quer sob uma carga pura ou combinada com outra força normal e/ou de cisalhamento e depois se verifica que uma força de tensão normal deve ser exercida para separar as superfícies (REGNEY, 1997).

A ligação adesiva é favorecida pela deformação plástica com superfície limpa. É um processo pelo qual a rugosidade nas superfícies de contato formam junções adesivas, e a ruptura dessas junções contribuem para transferência de material de uma superfície para outra. Esta transferência não produz partículas de desgaste, mas porções de material são removidas em passes subsequentes (KAHR, 1987).

O desgaste adesivo ocorre quando a ligação adesiva entre as superfícies é suficientemente forte para resistir ao deslizamento. Como resultado dessa adesão, uma deformação plástica é causada na região de contato, gerando uma trinca que pode se propagar levando à geração de um terceiro corpo e a uma transferência completa de material.

No desgaste abrasivo ocorre remoção de material da superfície. Esse desgaste ocorre em função do formato e da dureza dos dois materiais em contato (RADI et al., 2007).

Segundo Regney (1997), o desgaste adesivo é um dos principais mecanismos de desgaste. Apesar do grande número de estudos já realizados, uma teoria perfeita ainda não foi estabelecida. Em muitas aplicações da usinagem, o desgaste adesivo aparece, especialmente em ferramentas de corte ou na usinagem de aços resistentes ao calor e com grande quantidade de carbeto, utilizadas em baixa ou média velocidade de corte.

De acordo com Rabinowicz (1995), a adesão do material de trabalho com a ponta da ferramenta ocorre frequentemente, causando efeitos adversos na qualidade da ferramenta, bem como na estabilidade do processo. A Figura 4 mostra um exemplo de desgaste por adesão em uma ferramenta de corte.

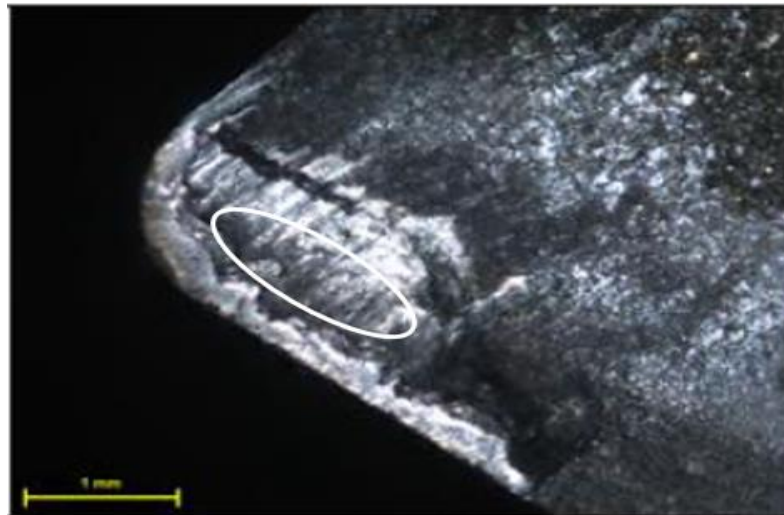


Figura 4 - Desgaste adesivo em ferramenta de metal duro - superfície de saída.

Fonte: Vogl (2007).

O desgaste por adesão ocorre sempre que superfícies metálicas se atritam, mesmo que tenham um excelente acabamento. Quando as superfícies estão em contato, apenas um número reduzido de pontos se toca e a área real de contato é muito pequena. Isto faz com que, mesmo para cargas leves, as pressões nos pontos de contato sejam grandes o suficiente para ultrapassar

a tensão de escoamento de um dos materiais, causando uma deformação plástica local até que a área real de contato seja aumentada a ponto de suportar a carga aplicada (RIBAS, 1991).

2.1.4 Desgaste por Fadiga

O desgaste por fadiga é caracterizado pela formação de trincas e lascamento de material causados por carregamentos cíclicos na superfície do sólido. Estes carregamentos podem ser resultantes de sólido e / ou líquido na superfície, em escalas microscópicas, este carregamento pode ser pela rugosidade superficial de sólido com movimento relativo (ALTERA, 2009).

As causas de desgaste abrasivo e adesivo dependem da interação direta entre as superfícies e tem seus efeitos cumulativos a partir do início do deslizamento. Já no caso da fadiga superficial, este desgaste não é progressivo, e se manifesta de forma abrupta, em um tempo que dificilmente pode ser previsto. Ele ocorre em superfície em contato com rolamento (ALTERA, 2009).

Devido ao rolamento, estas tensões de cisalhamento variam de zero a um máximo e retornam a zero, produzindo tensões cíclicas que poderão levar ao surgimento de trincas abaixo da superfície. A propagação dessa trinca fará com que ela aflore. Após surgir na superfície, sua propagação fica a cargo da penetração de óleo que, aprisionado e comprimido pela superfície rolante, age como uma cunha. Esta forma de desgaste é caracterizada pelo tamanho das partículas arrancadas e pela geometria das crateras deixadas. Na ausência de óleo, ocorrerá a formação de escamas de geometria diferentes (RIBAS, 1991).

Segundo Gonçalves (2013), o desgaste por fadiga superficial pode ser caracterizado pela formação de trincas e descamação de material causados por carregamentos alternados repetidos em superfícies sólidas como mostrado na Figura 5.

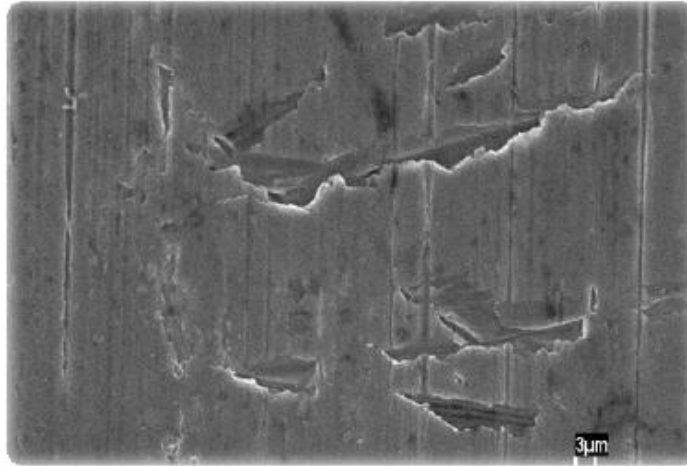


Figura 5 - Exemplo de desgaste por fadiga superficial, ensaio de Reichert Teste em pino de ferro fundido.
Fonte: Gonçalves (2013).

2.1.5 Desgaste Corrosivo

O desgaste corrosivo ocorre quando o material deslizante se localiza em meios corrosivos, sendo líquidos ou gasosos. Na ausência de deslizamento, os produtos da corrosão formam uma película sobre a superfície, que tende a retardar ou mesmo impedir a corrosão (RABINOWICZ, 1995).

Desgaste corrosivo e oxidativo ocorrem em inúmeras variedades de situações, tanto lubrificadas quanto não lubrificadas. Desgaste oxidativo é a melhor forma de representar o desgaste corrosivo de metais. O desgaste corrosivo é um termo geral relativo a qualquer modo de desgaste dependente de um processo químico ou corrosivo, enquanto que o desgaste oxido, refere-se ao desgaste provocado pelo oxigênio atmosférico (STACHOWIAK, 2001).

O processo de desgaste corrosivo ocorre por meio da remoção contínua e por atrito da película formada pela reação química na superfície de contato. A Figura 6 mostra a representação esquemática do mecanismo de desgaste: desgaste corrosivo.

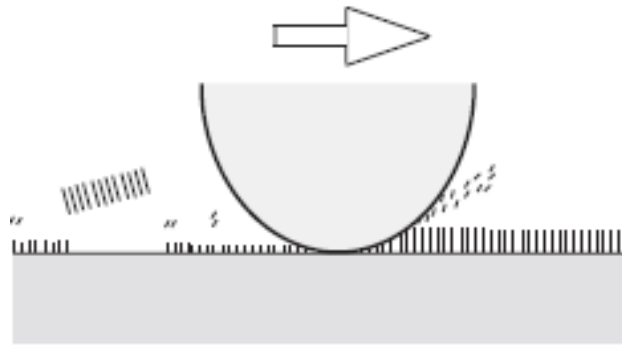


Figura 6 - Mecanismo de desgaste: desgaste corrosivo.
Fonte: Kato e Adachi (2001).

O desgaste corrosivo ocorre devido à interação da superfície de deslizamento com o ambiente que a envolve, fazendo com que o produto desta reação seja removido da superfície. O desgaste corrosivo pode ser controlado pela presença de detergentes alcalinos no lubrificante.

O ataque corrosivo inicia-se com rápidas reações, que irão diminuir com o tempo, Figura 7 (a). Este decréscimo nas reações está associado a formação de um filme lubrificante na superfície que separa os dois elementos reativos, mais ou menos de modo perfeito. Desta forma tem-se o fim do desgaste corrosivo após certa profundidade de produto da reação formado. Porém, em alguns casos as reações continuam indefinidamente desde seu início, Figura 7 (b), devido a não formação do filme protetor, ou seja, pela fragilidade ou porosidade do mesmo (STOETERAU, 2007).

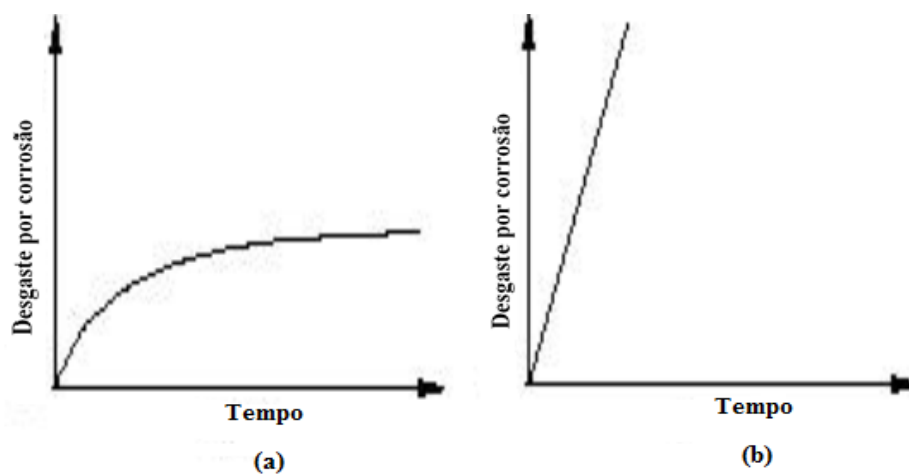


Figura 7 - Relação corrosão tempo para um sistema: (a) em que se forma um filme protetor da superfície; (b) em que não se forma filme, ou mesmo, que o filme não protege a superfície.
Fonte: Stoeterau (2007).

A corrosão é um fenômeno químico e eletroquímico que reduz as propriedades dos aços em serviço quando expostos a meios agressivos. Desgaste, ao contrário da corrosão, destrói o metal por meio da remoção mecânica da superfície (PEREIRA, 2010). A Figura 8 mostra detalhe do desgaste corrosivo.



Figura 8 - Detalhe do desgaste corrosivo em aquecedor tubular.
Fonte: Kejelin (2013).

2.1.6 Desgaste por Abrasão

O desgaste por abrasão é amplamente encontrado na indústria em peças com movimentos rotativos. Destaca-se como um dos principais tipos de desgaste, sendo um dos mais intensos e dos mais encontrados na prática, sendo responsável por 50 % das causas de falhas das máquinas ou componentes. Além disso, o desgaste abrasivo tem especial importância nas atividades agrícolas, de transporte e de mineração, atividades de importância estratégica para o nosso país (GONÇALVES, 2013).

Albertin (1993) descreveu o mecanismo de desgaste abrasivo como partícula suficientemente dura atacando uma superfície em um ângulo favorável e conseguindo atuar como uma ferramenta de corte, retirando “cavacos” (microcorte). Esta ação vem geralmente acompanhada por grande deformação plástica, observando-se acúmulo de material deslocado à frente do sulco e lateralmente, bem como deformação subsuperficial.

Desgaste abrasivo ocorre na remoção de material da superfície; sua ocorrência se dá em função do formato e da dureza dos dois materiais em contato. A Figura 9 apresenta desgaste por abrasão.

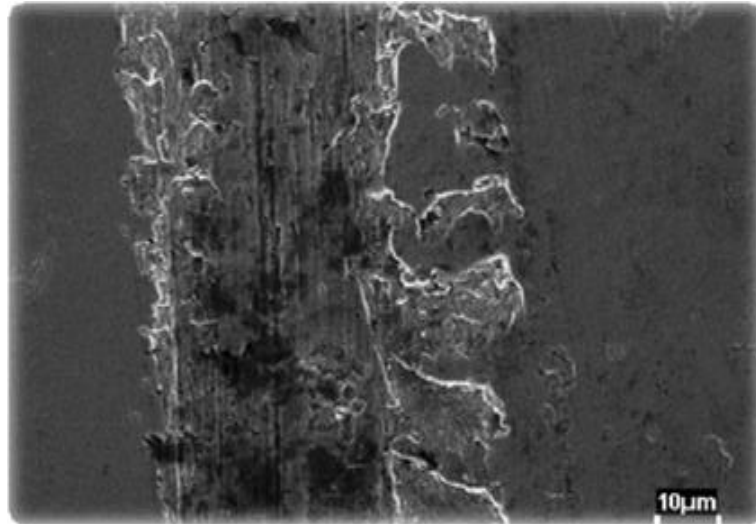


Figura 9 - Desgaste por abrasão, ensaio por meio do *Reicher Test* em um pino.

Fonte: Gonçalves (2013).

No combate à abrasão não é suficiente empregar materiais mais duros do que os materiais abrasivos, como a melhor solução. É necessário, também, levar em consideração os elementos que compõem o metal sujeito à abrasão e o tamanho dos respectivos grãos, como as causas, muitas vezes de importância decisiva.

O desgaste por abrasão é causado pela interação mecânica de saliências grosseiras ou partículas não metálicas contra as superfícies de trabalho, provocando perda de massa por corte ou por arrancamento. Estas partículas podem ser, por exemplo, um mineral como a sílica ou um fragmento de desgaste de material de alta dureza. Protuberâncias, como a rugosidade superficial, podem agir como partículas de alta dureza caso esta superfície apresente maior dureza que a contrapeça (SUSKI, 2004).

2.1.7 Desgaste Abrasivo de Dois Corpos

O desgaste por abrasão ocorre quando são removidas partículas de uma determinada superfície pela rugosidade de uma outra superfície dura ou por uma partícula abrasiva presente entre superfícies que mantêm movimento relativo. Portanto, o mecanismo de desgaste pode se apresentar de duas formas:

- a) abrasão a dois corpos;
- b) abrasão a três corpos.

A abrasão a dois corpos se produz, quando partículas abrasivas fixas apresentam movimentos em relação à superfície em estudo.

O desgaste abrasivo de dois corpos tem como característica principal a dureza superior de uma superfície em relação à outra e pela rugosidade da superfície mais dura. Caso isto não ocorra, provavelmente o abrasivo não será o mecanismo de desgaste dominante (RADI et al., 2007).

Nesta forma de desgaste, os picos da superfície dura, que desliza sobre a mole, risca-a arrancando partículas ou suas rugosidades. Embora pareça algo maléfico, este mecanismo de desgaste é muito bem aproveitado, tendo como exemplos a limpeza e retificação (ALTERA, 2009).

As partículas abrasivas agem como elementos interfaciais entre as superfícies em movimento relativo. As partículas estão livres na interface, deformando plasticamente as superfícies de contato (ALTERA, 2009).

A Figura 10 mostra uma representação esquemática do desgaste abrasivo de dois e três corpos.

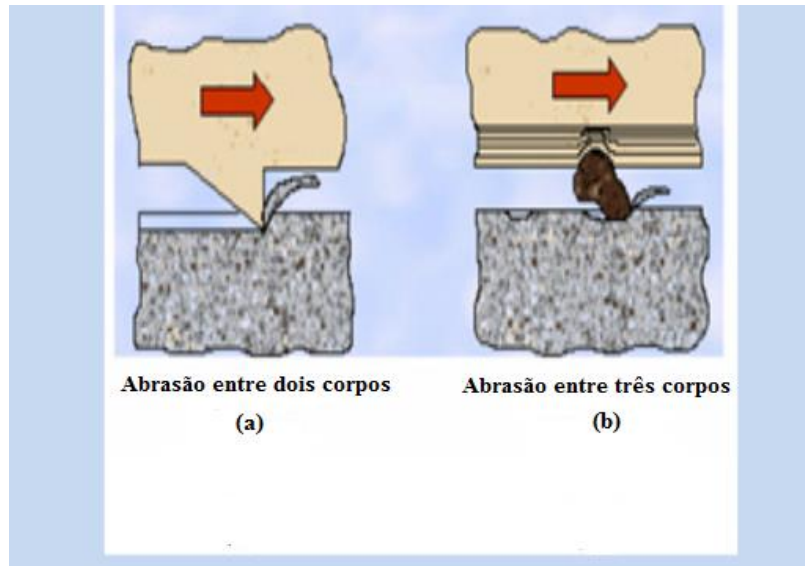


Figura 10 - Representação esquemática do desgaste abrasivo: (a) abrasão entre dois corpos; (b) abrasão entre três corpos.
 Fonte: Altera (2009).

2.1.7.1 Desgaste Abrasivo de Três Corpos

Já no desgaste abrasivo de três corpos, a presença de uma partícula abrasiva entre as superfícies, provocará prejuízo na partícula de dureza superior. Isto porque há uma tendência de algumas partículas abrasivas se incrustarem na superfície mais mole, riscando a outra. Esta aderência é transitória, enquanto que outros grãos abrasivos ficam rolando entre as superfícies sem causar prejuízo significativo. Para que este tipo de desgaste ocorra, é necessário que as partículas abrasivas não sejam muito finas e que sejam mais duras que as superfícies do sistema.

A abrasão a três corpos, representa a interposição de partículas abrasivas livres entre duas superfícies em movimento relativo. Ressalta-se que, muito embora os casos de abrasão a três corpos sejam mais comuns, ser encontrado em etapas na evolução do processo a dois corpos, a maioria dos estudos dedicados à abrasão reproduz a configuração a dois corpos (RIBAS, 1991).

Dependendo das características do material do contra corpo utilizado no ensaio a três corpos, como a dureza e a tenacidade, as partículas abrasivas podem engastar na superfície deste, ocasionando apenas riscamento, ou rolaem, causando apenas indentações (FANG et al., 1993).

2.2 Reações Triboquímicas

O desgaste pela reação triboquímica é caracterizado pelo atrito entre duas superfícies sólidas em um ambiente corrosivo e não lubrificado, que pode ser líquido ou gasoso. Neste processo de desgaste forma-se uma camada (devido a uma reação química) e, posteriormente, ocorre à remoção contínua dessa camada na superfície de contato. Na presença de oxigênio, as partículas de desgaste consistem basicamente de óxidos, os quais são formados sobre as superfícies e são removidas por atrito (BERALDO, 2011).

Segundo Zum Gahr (1987) e Suski (2004), os mecanismos de desgaste triboquímicos podem ser divididos em quatro categorias:

A) Contato metálico entre a rugosidade das superfícies, que ocasiona uma remoção de metal devido à adesão e pequenas partículas de desgaste. Devido a junção localizada entre superfícies sólidas em contato, levando a transferência de material entre as duas superfícies ou perda de uma delas. Sólidos têm a tendência de se unir.

B) Reações químicas dos metais com o ambiente que resultam em camadas protetivas superficiais e reduzem o contato metálico. Para que ocorra reação é necessário satisfazer determinadas condições. Uma delas é que deve haver afinidade química entre os reagentes, isto é, eles devem interagir de modo a possibilitar a formação de novas substâncias.

C) Trincamento de camadas protetivas superficiais devido à alta pressão local ou microfadiga levando a partículas não-metálicas de desgaste.

D) Partículas metálicas e não metálicas podem agir abrasivamente e desgastar as superfícies de contato. Novas formações e remoção de camadas protetivas superficiais podem levar a um maior desgaste.

No decorrer deste processo, pode ocorrer simultaneamente as condições de desgaste por adesão ou por abrasão. Se o resultado da corrosão é duro e abrasivo, partículas originárias do processo corrosivo que possam existir entre as superfícies em contato, acelerarão o desgaste abrasivo (STOETERAU, 2007).

O desgaste triboquímico, pode ser caracterizado pela perda ou degradação da superfície de um material, devido à ação química ou eletroquímica do ambiente agressivo; ou devido à remoção de material, facilitada por meios mecânicos através de reação química, como atrito entre duas superfícies sólidas que reagem com um meio corrosivo, que podem ser líquido ou gasoso. O processo de desgaste se dá pela continuidade da interação triboquímico entre a superfície e o meio (RADI et al., 2007).

Na Figura 11 pode-se ver uma representação esquemática dos mecanismos envolvidos nos desgastes triboquímicos.

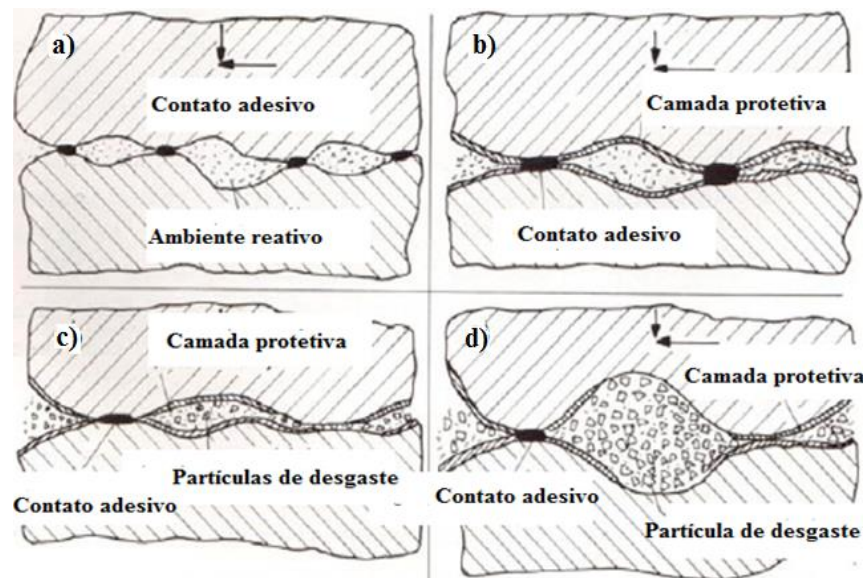


Figura 11 - Mecanismos envolvidos em desgaste triboquímico.
 Fonte: Zum Gahr (1987); Kalpakjian (1995).

2.3 Comportamento Tribológico

Conhecimento prévio da intensidade do fenômeno permite a engenharia verificar se o componente poderá atingir a vida útil que se espera para o mesmo. Conhecer a forma como o ocorre o desgaste permite selecionar adequadamente o material para cada aplicação uma vez que o fenômeno de desgaste depende não apenas do material, mas também do sistema no qual ele ocorre. Para se conhecer a forma pela qual o desgaste ocorre é importante conhecer dois aspectos do problema. Um é o tipo principal de movimento que causa desgaste, como se vê na norma DIN 50320 (Análise de Sistemas

de Processos de Desgaste - 1979) ou seja: o deslizamento, o rolamento, o movimento oscilatório e o de impacto. O segundo aspecto a ser considerado são os mecanismos de desgaste, que são: a adesão (seguida de deformação plástica e ruptura das junções entre corpos), a abrasão, as reações triboquímicas e a fadiga superficial (LEITE et al., 2009).

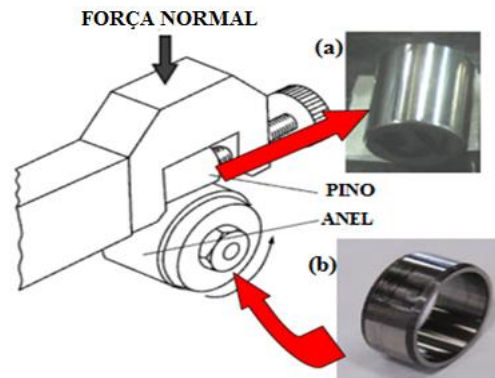
As máquinas de ensaios tribológicos são recursos que servem para medir atrito ou desgaste dos materiais em condições controladas, e são frequentemente utilizados nas mais diversas pesquisas realizadas na área da tribologia. Este equipamento deve ser selecionado cuidadosamente, objetivando recriar todas as características críticas do atrito ou desgaste, com investimentos reduzidos, sem a complexidade associada à utilização dos ensaios nos processos reais de fabricação. No entanto, uma seleção inadequada pode fornecer resultados errados (GONÇALVES et al., 2014).

Segundo Mang (2007), o universo de escolha deve ser bastante criterioso, devido à enorme variedade das máquinas e para a sua escolha, faz-se necessário responder a várias questões que satisfaçam o seu interesse de estudo nos ensaios tribológicos.

Os tribômetros vêm sendo utilizados por muitos autores para fins de pesquisas de base, com relação aos entendimentos dos mecanismos de atrito bem como para uma melhor compreensão da influência de variáveis como pressão de contato, velocidade de escorregamento, temperatura, composição química, acabamento superficial, entre outras sobre o atrito e desgaste dos materiais.

Uma das vantagens de se aplicar ensaios tribológicos para a investigação do potencial de óleos lubrificantes é a utilização de um volume reduzido da amostra a ser estudada (STOETERAU, 2007).

O aparato do tipo *Reichert Test* é um equipamento utilizado para ensaios de desgaste. Ele consiste em proporcionar um atrito entre um anel e um pino, para a realização do experimento. É uma técnica de ensaio importante para estudar propriedades tribológicas de materiais e a interação de fluidos lubrificante com diversos tipos de materiais. Para garantir o filme lubrificante, um terço da parte inferior do anel é imerso no óleo em teste. No ensaio, quanto melhor for à capacidade de lubrificação do fluido teste, menor será a área da cratera e a perda de massa (GONÇALVES, 2013). A Figura 12 mostra o pino e o anel usados no tribômetro *Reichert Test*.



**Figura 12 - (a) representa o pino; (b) anel.
Fonte: Gonçalves (2013).**

2.4 Ferro Fundido

Com o advento da revolução industrial, o ferro fundido recebeu grande ênfase ao seu desenvolvimento com relação às suas propriedades e vantagens econômicas. Atualmente, o ferro fundido está entre os materiais mais produzidos, após o aço. Uma das vantagens dos ferros fundidos é a possibilidade de obtenção de peças com formas complexas, além disso, o ferro fundido apresenta uma boa capacidade de absorver vibrações quando usado nas estruturas de máquinas. O bloco de motor de combustão interna é um exemplo da complexidade geométrica que pode ser obtida com o processo de fundição, tornando-se a forma mais econômica para a fabricação de peças com geometria complexa.

Conforme o diagrama de equilíbrio Fe-C, o ferro fundido apresenta como uma liga, cujo teor de carbono se situa acima de 2,0% de carbono. Como há influência do silício nesta liga, o ferro fundido é considerado uma liga ternária Fe-C-Si porque o silício sempre está presente em teores superiores ao do próprio carbono. Por outro lado, o carbono em quantidade superior à que é retida em solução sólida na austenita, resulta em carbonos parcialmente livres na forma de veios de grafita (SINTERCAST, 2010).

Chiaverini (2005) definiu ferro fundido como uma liga binária de ferro (Fe) e carbono (C) acima de 2%. Entretanto o elevado teor de carbono dessas ligas e a presença sempre obrigatória do elemento silício (Si) torna-se necessário classificá-los como uma liga ternária de Fe-C-Si.

De acordo com Chiaverini (2005), os ferros fundidos podem ser classificados nos seguintes tipos de liga:

- Ferro fundido cinzento – cuja fratura caracteriza pela coloração escura, o carbono e o silício apresenta como elementos de liga fundamentais na estrutura em que uma parcela relativamente grande do carbono está no estado livre (grafita lamelar) e outra parcela no estado combinado (Fe_3C);
- Ferro fundido branco – cuja fratura mostra uma coloração clara (daí a sua denominação), caracterizado por apresentar ainda como elementos de liga fundamentais o carbono e o silício, mas cuja estrutura, devido às condições de fabricação e menor teor de silício, apresenta o carbono quase inteiramente na forma combinada (Fe_3C);
- Ferro fundido nodular – caracterizado por apresentar, devido a um tratamento realizado ainda no estado líquido, carbono livre na forma de grafita esferoidal, o que confere ao material característica de boa ductilidade;
- Ferro fundido de grafita compacta (vermicular) – considerado um material intermediário entre o ferro fundido cinzento e o nodular. Possui a fundibilidade do ferro fundido cinzento com melhor resistência mecânica e alguma ductilidade.

2.4.1 Ferro Fundido CGI

O ferro fundido vermicular, também conhecido como *Compacted Graphite Iron* (CGI), foi descoberto por acaso durante fabricação do ferro fundido nodular, devido procedimento errado em composição química.

O ferro fundido vermicular pode ser considerado um material intermediário entre o ferro fundido cinzento e o ferro fundido nodular; possui a fundibilidade do ferro fundido cinzento com melhor resistência mecânica e alguma ductilidade. Possui maior capacidade de amortecimento e possui também condutividade térmica mais elevada, propriedades mecânicas superiores ao ferro fundido nodular (CHIAVERINI, 2005).

No ferro fundido vermicular, a presença de elementos químicos mantem em uma faixa bastante estreita, entre 0,010% e 0,012%. Em patamares superiores, o ferro deixa de ser vermicular e perde suas características. O ferro fundido nodular, que tem outras propriedades, é utilizado na fabricação de virabrequins, por exemplo e pode ter entre

0,035% e 0,060% de magnésio em sua composição. A presença de magnésio na quantidade exata, faz com que se formem no ferro fundido, estrias grossas, ou “vermes” de grafita - daí o seu nome vermicular (GUESSER e GUEDES, 1997).

O ferro fundido vermicular pode ser considerado um material intermediário entre o ferro fundido cinzento e o ferro fundido nodular; possui a fundibilidade do ferro fundido cinzento com melhor resistência mecânica e alguma ductilidade. Possui maior capacidade de amortecimento e possui também condutividade térmica mais elevada que o ferro fundido nodular (DORÉ et al., 2007).

As vantagens do ferro fundido vermicular com relação ao ferro fundido nodular, segundo CHIAVERINI (2005) são:

- Coeficiente mais baixo de dilatação térmica;
- Maior condutibilidade térmica;
- Maior resistência ao choque térmico;
- Maior capacidade de amortecimento;
- Maior fundibilidade;

As vantagens do ferro fundido vermicular com relação ao ferro fundido cinzento, segundo CHIAVERINI (2005) são:

- Maior resistência à tração para o mesmo carbono equivalente, o que reduz o uso do elemento de liga de custo elevado como o níquel, cromo, cobre e molibdênio;
- Relação mais alta de resistência/fadiga;
- Maiores ductilidade e tenacidade, o que resulta em margem superior de segurança para fratura;
- Menor oxidação e dilatação em temperaturas elevadas. A Figura 13 mostra a forma de grafite nos ferros fundidos.

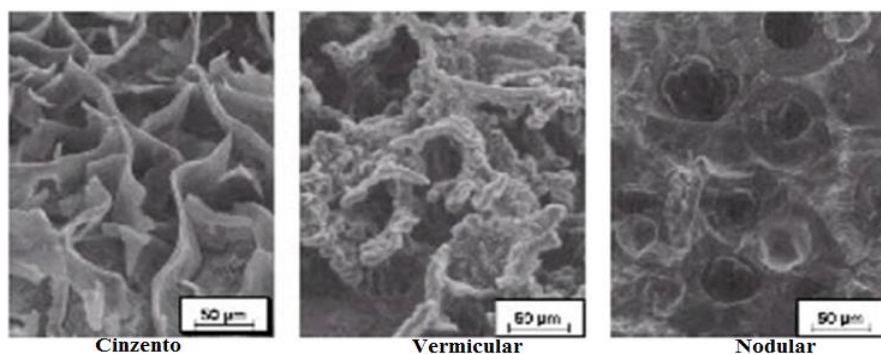


Figura 13 - Formas do grafite nos ferros fundidos.
Fonte: Sintercast (2010).

As propriedades superiores do ferro fundido vermicular quando comparadas com as propriedades do ferro fundido cinzento, é devido à forma da grafita: resistência mecânica, tenacidade e resistência ao choque térmico e condutividade térmica, conforme visto na Tabela 1. A sua microestrutura resultado de uma adesão mais forte entre a grafita e a matriz de ferro, inibindo assim a iniciação e o crescimento de trincas e garantindo com isso as propriedades mecânicas superiores (DORÉ et al., 2007).

Tabela 1 - Propriedades mecânicas e físicas dos ferros fundidos cinzento, vermicular e nodular.

Propriedade Mecânica	Cinzento	Vermicular	Nodular
Resistência a tração (Mpa)	250	450	750
Modulo de Elasticidade (Gpa)	105	145	160
Alongamento (%)	0	1,5	5
Condutibilidade Térmica (W/mk)	48	37	28
Capacidade Relativa Amortecimento	1	0,35	0,22
Dureza (BHN10/3000)	179-202	217-241	217-255
Limite de Fadiga (Mpa)	110	110	250

Fonte: Dawson (2002).

2.4.2 Usinabilidade do Ferro Fundido CGI

A usinabilidade é uma propriedade dos materiais de se deixarem trabalhar com ferramentas de corte um determinado material. Ela também está relacionada ao desgaste da ferramenta de corte, entendendo-se assim que um material de alta usinabilidade resulta em longa vida da ferramenta. A usinabilidade envolve ainda outros aspectos como força de corte e acabamento superficial (GUESSER, 2009).

Conforme Weingaertner e Schroeter (2002) para caracterizar a usinabilidade, geralmente são usados quatro critérios:

- Vida da ferramenta;
- Força de usinagem;
- Qualidade da superfície da peça;
- Formação de cavacos, com forma e tamanho dos cavacos.

Guesser (2009) relatou que a microestrutura é um fator que pode afetar significativamente a usinabilidade, de diversas maneiras:

Abrasividade: fragmentos duros contidos na microestrutura contribuem para o desgaste por abrasão da ferramenta de corte é também responsável pelo aumento da força de corte.

Lubrificação na interface ferramenta/cavaco: ação lubrificante resulta da grafita e de partículas de sulfeto de manganês presentes no material da peça.

Quebra do cavaco: o sulfeto de manganês e a grafita, particularmente a lamelar, favorecem a quebra do cavaco, diminuindo o tamanho da região de contato e também o tempo de contato cavaco/ferramenta.

As tolerâncias de fabricação especificadas nos projetos não podem ser obtidas diretamente do processo de fundição. Dessa forma, para obter detalhes específicos, melhorar o acabamento da superfície e a precisão dimensional, recorre ao processo de usinagem.

A composição química do ferro fundido está ligada à sua dureza e dos componentes da microestrutura, razão pela qual deve ser considerada na seleção da velocidade de corte na usinagem, assim como de outros materiais (WEINGAERTNER; SCHROETER, 2002).

Durante a usinagem, a formação do cavaco inicia-se pela deformação elástica do material que, após ultrapassar limites de escoamento, promove a deformação plástica do mesmo. A Figura 14 mostra a representação da cunha de corte.

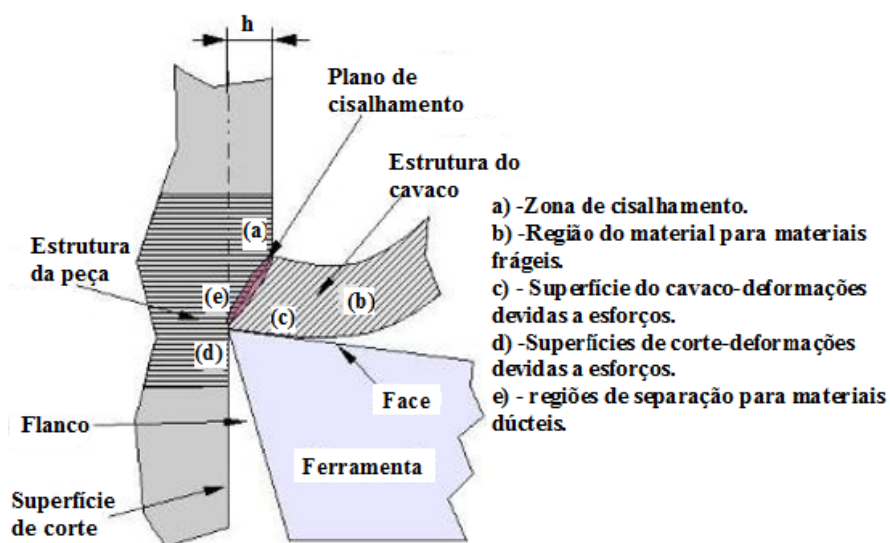


Figura 14 - Representação esquemática da cunha de corte.
 Fonte: Trent (2000).

Caso o material seja frágil, o cavaco quebrará na zona de cisalhamento, não se formando sobre a face da ferramenta de corte, gerando o desgaste por abrasão. Um exemplo deste caso é a usinagem de ferro fundido na qual o cavaco rompe em pequenos segmentos.

Do ponto de vista da usinabilidade, os ferros fundidos vermiculares estão entre os ferros fundidos nodulares e os cinzentos. A menor condutividade térmica na usinagem do CGI geram forças de corte mais altas e mais calor na área de corte. Um maior teor de titânio na composição do CGI, tem influência negativa na vida útil da ferramenta (DAWSON, 2002).

2.5 Usinagem por Fresamento

Ferraresi (2009) define o fresamento sendo uma operação cuja ferramenta, a fresa possui arestas cortantes dispostas simetricamente em torno de um eixo e que tem como função a retirada do material por meio de movimentos de corte provido pela rotação da mesma sobre seu eixo. O movimento de avanço é feito geralmente pela mesa da máquina. A Figura 15 mostra uma fresa multiarestas para operação de faceamento em desbaste.



**Figura 15 - Fresa multiarestas para faceamento em desbaste de ferro fundido.
Fonte: Cimm (2016).**

O fresamento, ainda que complexo, é um dos processos de usinagem com maior emprego na indústria atual, devido ao seu desempenho na taxa de remoção de material e formas complexas, com boa precisão dimensional, além de ser um processo de elevada flexibilidade, sendo utilizados na fabricação de superfícies planas, contornos, ranhuras e cavidades, entre outras (MARCELINO et al., 2004).

2.5.1 Formas de Desgaste em Ferramentas de Corte

De acordo com a norma ISO 3685 “teste ferramenta de vida com ferramentas” o desgaste de uma ferramenta é o resultado de mudanças original em sua geometria, que acontecem durante o processo de corte.

O desgaste de uma ferramenta é considerado como uma perda contínua e microscópica de partículas da ferramenta devido à ação do corte. São considerados como problemas críticos na usinagem, pois prejudica a produção e reduz a qualidade final do produto (DINIZ et al., 2002).

O desgaste pode atingir níveis elevados e comprometer a qualidade do processo de usinagem. Ele ocorre de maneira progressiva, implicando na perda de material tanto da superfície de saída como da superfície de folga. Pode ocorrer tanto no corte interrompido como no contínuo (SOUTO, 2007).

As operações dependem de alguns parâmetros que podem ser melhorados, porém estes estão limitados a selecionar de forma adequada a ferramenta de desbaste.

Segundo Ferraresi (2009) o desgaste da ferramenta se deve a uma soma de variáveis, dentre eles destacam-se a remoção de cavacos, que representa contato e atrito com a ferramenta, a velocidade e força de corte, material utilizado na fabricação da ferramenta, alta temperatura no processo de remoção do material, bem como a dureza do material a ser usinado, entre outros.

Baseado na afirmação, Shabtay e Kaspi (2002) afirmaram que a vida de uma ferramenta de corte termina de duas formas diferentes: o desgaste gradual ou progressivo de certas regiões na superfície do flanco e de saída da ferramenta, ou de uma falha catastrófica que pode acarretar um fim prematuro para a vida da ferramenta.

A Figura 16 apresenta os três tipos de desgaste mais comumente encontrados em ferramentas de corte durante a usinagem.

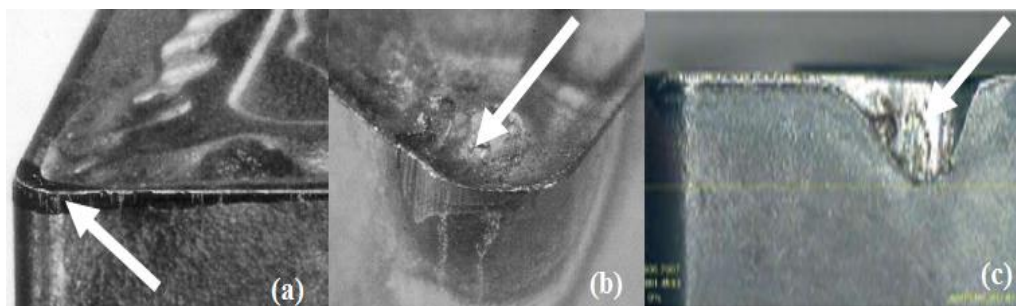


Figura 16 - Formas de desgaste: (a) de flanco; (b) de cratera; (c) de entalhe.
Fonte: Freitas (2013).

O desgaste de flanco está presente em toda operação de usinagem e atinge a superfície de folga da ferramenta. É causado principalmente pela abrasão e é potencializado em operações onde o material usinado apresenta alta dureza ou incrustações, ou quando a temperatura de corte alcança valores onde o material da ferramenta começa a perder sua dureza. Esse tipo de desgaste interfere diretamente no acabamento superficial da peça e finalmente, no custo final do produto em um projeto, pois, o valor da rugosidade superficial é um dos requisitos mais comumente especificados (PARK e KWON, 2011).

Desgaste de cratera, segundo Diniz (2002), caracteriza-se por desgastar a superfície de saída da ferramenta, em decorrência do atrito entre a ferramenta e o cavaco que consiste em uma cavidade localizada na superfície de saída da ferramenta, que é formada e evolui pela ação do deslizamento do cavaco contra a superfície. A região do contato cavaco-ferramenta é caracterizada por altas temperaturas e tensões, que contribuem para a ação do desgaste. A cratera pode ser medida considerando-se tanto pela sua profundidade como por sua área.

Desgaste de entalhe é caracterizado por avaria excessiva localizada na região da face e flanco da ferramenta na altura da profundidade de corte, verificada principalmente na usinagem de materiais com baixo coeficiente térmico. Uma condição extrema de desgaste de flanco é comum surgir na aresta de corte, na posição correspondente à superfície original da peça. Ocorre em razão da superfície de trabalho original ser mais dura e/ou mais abrasiva que o material do interior, podendo ser causado por encruamento

pela deformação plástica a frio ou usinagem prévia, partículas de areia na superfície de fundidos. Como consequência de uma superfície mais dura, o desgaste é acelerado nessa localização, correspondente à superfície original da peça, que se caracteriza o chamado desgaste de entalhe (SOUTO, 2007).

2.5.2 Critérios de Fim de Vida da Ferramenta.

Segundo Stemmer (2005), identificar quando ocorre o fim da vida da ferramenta é de fundamental importância no estudo da usinabilidade. Nos testes práticos de laboratório diversos critérios para determinar este ponto, dependendo a escolha, em grande parte, das exigências da usinagem (precisão de medidas, grau de acabamento, potência consumida) e do material da ferramenta.

À medida que a ferramenta vai se desgastando, observam-se variações mais ou menos profundas no processo de usinagem. A temperatura se eleva progressivamente, a força de corte e a potência consumida aumentam, as dimensões da superfície usinada se altera, o acabamento superficial piora. Em condições extremas, ocorre um faiscamento intenso no corte, a superfície usinada torna-se áspera. Em ferramentas de metal duro o aumento da força de usinagem, no caso de um desgaste excessivo, provoca o lascamento e destruição da aresta de corte (STEMMER, 2005).

Kegg (1984) determinou que, em média, 6,8% do tempo improdutivo em centros de usinagem é causado por falhas na ferramenta. Teoricamente, em operações de desbaste, pode-se adotar como critério de fim de vida da ferramenta, a força ou a temperatura de corte encontradas no processo em determinado momento, grandezas estas relacionadas a um determinado valor de desgaste, que pode causar a quebra da ferramenta.

Ao avaliar a vida de uma ferramenta, é necessário mensurar e quantificar o desgaste. Quando isso é possível, deve-se seguir os parâmetros mostrados na Figura 17 que são quantificados pela norma ISO 3685/93 (*Tool life testing with single-point turning tools*), que recomenda a substituição da ferramenta ao atingir qualquer um destes limites.

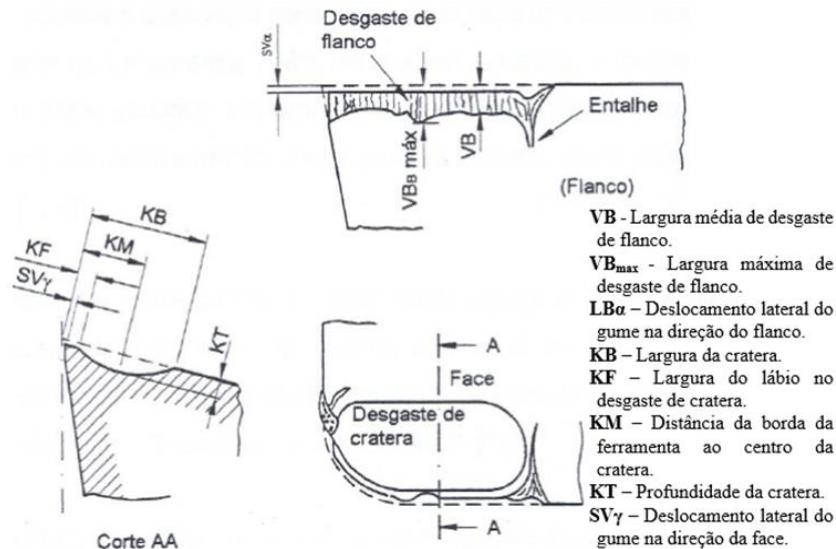


Figura 17 - Principais parâmetros utilizados para quantificar os três tipos de desgaste.

Fonte: ISO 3685 (1993).

Os desgastes nas ferramentas de corte de aço rápido, metal duro e cerâmica são quantificados pela norma ISO 3685:1993, utilizada como referência para a definição do critério de fim de vida da ferramenta em operações de desbaste. Para ferramentas de cerâmica, os critérios mais comuns são os relativos ao desgaste de flanco médio e máximo, cujos valores são os mesmos indicados para ferramentas de metal duro.

- Desgaste de flanco médio ($V_{BB} = 0,3 \text{ mm}$).
- Desgaste de flanco máximo ($V_{BB \text{ máx}} = 0,6 \text{ mm}$), no caso do desgaste não ocorrer de forma regular ao longo do flanco.
- Profundidade de cratera ($KT = 0,06 + 0,3 f$), onde f é avanço em mm/rot.
- Desgaste de entalhe ($V_{BN} = 1 \text{ mm}$).
- Falha catastrófica.

As fases da evolução do desgaste da ferramenta de corte são mostradas graficamente na Figura 18.

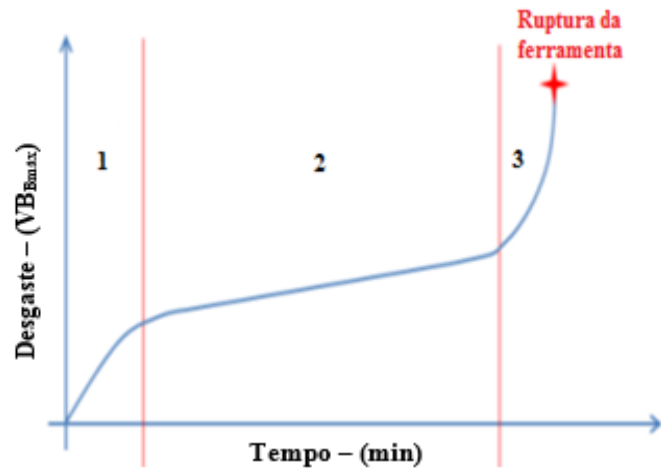


Figura 18 - Evolução do desgaste da ferramenta em função do tempo de usinagem.

Fonte: Machado et al. (2011).

- Fase 1: É a fase inicial do corte, onde a ferramenta se desgasta aceleradamente devido à adequação do sistema tribológico, como se a cunha cortante estivesse se adaptando ao processo.
- Fase 2: A característica predominante é um desgaste com uma taxa lenta e aproximadamente constante ao longo do tempo de usinagem. Nessa fase há uma acomodação da evolução do desgaste.
- Fase 3: Nesse último estágio inicia-se a aceleração acentuada do desgaste em um curto espaço de tempo e posteriormente poderá acontecer a falha catastrófica da ferramenta.
- O critério mais comum em ensaios de vida de ferramentas de corte é a utilização do desgaste de flanco médio, $V_{BB} = 0,3 \text{ mm}$.

2.6 Fluidos de Corte

Geralmente a usinagem do ferro fundido é realizado a seco em virtude da presença da grafita e do sulfeto de manganês em sua microestrutura, isso em razão da grafita ter ação lubrificante e o sulfeto de manganês favorecer a quebra do cavaco, entretanto, devido a forma da grafita, nos ferros fundidos nodulares a quebra do cavaco não ocorre tão facilmente como nos outros e o cavaco permanece mais tempo em contato

com a ferramenta, neste caso a utilização do fluido de corte é recomendada (GUESSER, 2009).

Nayyar et al. (2012) em seus experimentos, concluíram que a utilização de fluido de corte no torneamento de ferros fundidos nodulares, a vida da ferramenta foi aumentada e a força de corte foi reduzida.

Lutif et al. (2015) estudaram a aplicação de diferentes bases de fluido de corte no fresamento do ferro fundido vermicular (CGI) pela técnica de aplicação por mínima quantidade de lubrificantes (MQL) e constataram que o fluido vegetal de pinhão manso teve um desempenho melhor quando comparado com um fluido mineral com a mesma concentração, ou seja, 8%, nos ensaios de vida da ferramenta e de acordo com o autor, esse fato se deve pois os óleos vegetais possuem maior quantidade de ácidos graxos insaturados e cadeias carbônicas longas, todavia o resultado é invertido quando o assunto é consumo de potência, onde o fluido mineral leva vantagem em relação ao fluido vegetal.

Os fluidos de corte possuem as funções, dentre tantas, de lubrificar a zona de corte em baixas velocidades de corte; de refrigerar em altas velocidades de corte, como também de propiciar produção de peças com acabamento superior, pela redução ou eliminação da aresta postiça de corte (APC) e pela redução das forças de corte devido ao efeito lubrificante (MACHADO et al., 2009).

Os fluidos e lubrificantes utilizados no processo de usinagem possuem uma representatividade de 16 a 20% nos custos de fabricação. Por consequência dos efeitos negativos associados pelos fluidos de corte, muitas pesquisas têm sido direcionado no sentido de minimizar o uso de fluidos de corte ou evitá-los totalmente (SREEJITH e NGOI, 2000). A Figura 19 apresenta um dispositivo de aplicação de fluido de corte em diferentes processos de usinagem utilizando a técnica pelo sistema de mínima quantidade de lubrificantes (MQL).



Figura 19 - Dispositivo para aplicação de fluido de corte: sistema MQL.
Fonte: Cimm (2016).

O uso do lubrificante reduzirá a quantidade de calor gerado por meio do atrito por decréscimo do contato metal-metal, pois o atrito é reduzido cerca de 30% quando na sua utilização (ALVES, 2005; SECCO et al., 2013).

Deve ser considerado que os fluidos de corte mudam sua composição durante a usinagem, ocasionando também uma mudança nos riscos oferecidos ao meio ambiente. Podem ser formadas ainda substâncias secundárias, produtos de reações originados durante o processo, corpos estranhos e microrganismos que são agregados ao fluido de corte (OLIVEIRA e ALVES, 2007).

O grande desempenho dos fluidos de corte é também devido aos avanços obtidos nos processos de fabricação dos fluidos, mas muito mais pelo desenvolvimento de novos aditivos. Com isto, os fluidos de corte atuais tem apresentado melhores propriedades refrigerantes, melhores propriedades lubrificantes, são menos agressivo ao operador e duram consideravelmente mais, com menos problemas de armazenagem quando comparados os fluidos de corte de gerações passadas (MACHADO e DINIZ, 2000).

2.6.1 Fluido de Corte de Base Vegetal

A usinagem dos metais ocupa uma posição de grande destaque dentro da indústria metalmeccânica e está presente em praticamente todas as fases de manufatura de componentes nas mais diversas áreas.

Os processos de usinagem geram uma grande quantidade de calor que provoca resultados indesejáveis no produto final, além de elevar o custo de produção deste.

Neste contexto, o emprego do fluido de corte torna-se indispensável para minimizar os efeitos negativos da geração de calor na usinagem.

Grande parte dos óleos lubrificantes utilizados nos processos de usinagem é de base mineral. Os óleos minerais apresentam boa capacidade de lubrificar e elevada estabilidade, proporcionando um aumento na vida útil da ferramenta. Porém, estes produtos podem provocar diversos efeitos nocivos à saúde dos trabalhadores e ao meio ambiente.

A busca por produtos que causem menores efeitos negativos aos trabalhadores e meio ambiente tem sido intensificado na última década. Pesquisas indicam que os óleos vegetais provenientes de fontes renováveis possuem grande potencial para substituir os óleos de origem mineral (SOUZA et al., 2012).

Devido à necessidade crescente de adequação aos requisitos atuais de segurança do trabalhador e ao meio ambiente, novas combinações de tipos de fluidos de corte estão sendo pesquisados. Um fluido de corte para ser considerado amigo do ambiente, deve possuir características como biodegradabilidade, não ser tóxico e fisiologicamente seguro, em uso, deve ter emissões reduzidas. Mas também deve apresentar desempenho durante o processo, compatíveis com o obtido pelos produtos de origem fóssil.

É de conhecimento que a natureza pode fornecer uma grande quantidade de matérias-primas para a fabricação de lubrificantes. Estas variedades de matérias-primas, aliadas aos novos métodos e processos modernos de refino, possibilitam a eliminação dos problemas dos óleos vegetais de antiga tecnologia, como a resinificação, a viscosidade e acidez (SOUZA et al., 2012).

Woods (2005) relatou que os óleos integrais vegetais possuem várias vantagens, entre elas: são mais compatíveis com a pele humana do que os óleos minerais, e também têm uma tendência reduzida à formação de vapor, névoa e fumaça, além de ter um ponto

de fulgor maior, reduzindo o risco de incêndio nas máquinas. Têm moléculas polares que funcionam como se fossem ímãs e se alinham à superfície do metal, formando um filme lubrificante capaz de suportar grandes tensões superficiais, facilitando a usinagem e melhorando a vida das ferramentas; a Figura 20 mostra o alinhamento das moléculas de óleos vegetais. As moléculas dos óleos minerais não são polares, e por esse motivo a sua capacidade lubrificante é inferior à dos óleos vegetais. Isso também é uma vantagem quando se deseja maior produtividade (KURODA, 2006).

Assim como os óleos minerais, os óleos vegetais não podem ser queimados, apesar de poluir menos o ambiente. Porém, a principal vantagem ecológica dos óleos vegetais, ao contrário dos óleos de base mineral, é que sua matéria-prima é degradável, poluindo menos o meio ambiente, são recursos renováveis. Eles também podem ser reutilizáveis, como os de base mineral (KURODA, 2006).

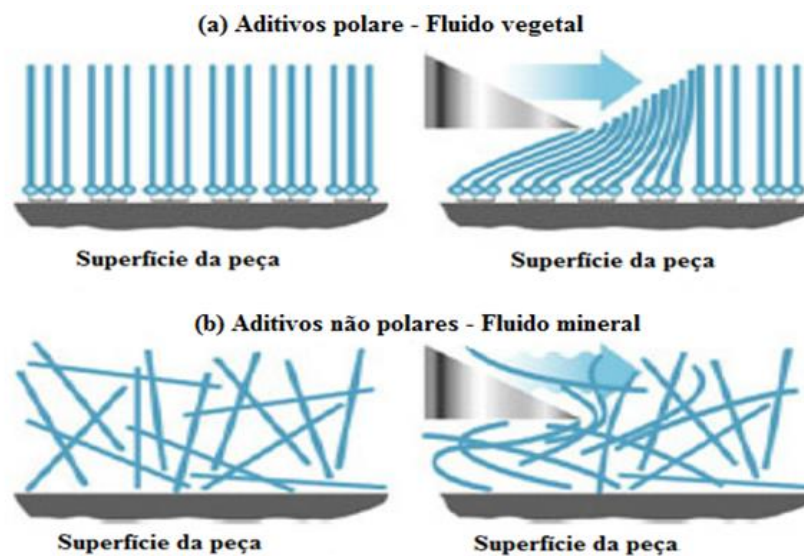


Figura 20 - Esquema de alinhamento das moléculas: (a) óleos vegetais; (b) óleo mineral.

Fonte: Kuroda (2006).

É de conhecimento que a natureza podem fornecer uma grande quantidade de matérias-primas para a fabricação de lubrificantes. Estas variedades de matérias-primas, aliadas aos novos métodos e processos modernos de refino, possibilitam a eliminação dos problemas dos óleos vegetais de antiga tecnologia, como a resinificação, a viscosidade e acidez (SOUZA et al., 2013).

No cenário brasileiro, a pesquisa para utilização de novos óleos de base vegetal deve considerar a oportunidade por sua extensão territorial e área geográfica, clima tropical e subtropical, que favorece o cultivo de uma diversidade de oleaginosas para a produção de óleos vegetais (GRUSZYNSKI, 2002).

2.6.2 Estudos de Óleos Vegetais para Possíveis Aplicações como Lubrificantes

Estudos visando à substituição de lubrificantes convencionais por lubrificantes a base de óleo vegetal tem se tornado bastante atraente, pois estes apresentam características desejáveis, como boa lubricidade, são menos poluentes, não tóxicos, propriedades anticorrosivas, alto ponto de fulgor, apresentam alto índice de viscosidade e baixa volatilidade, além de serem mais baratos que os convencionais (ERHAN et al., 2008).

Porém, a presença de insaturações na molécula de ácidos graxos componentes do óleo vegetal conferem aos biolubrificantes uma baixa estabilidade térmica e oxidativa, além de baixo desempenho em baixas temperaturas (ARBAIN e SALIMON, 2011; SALIH et al., 2011).

A modificação da estrutura química do óleo vegetal, por diferentes caminhos tem sido uma alternativa para obtenção de lubrificantes de base vegetal com alta estabilidade oxidativa. As principais maneiras são a transesterificação e a epoxidação. Esta última se torna uma alternativa interessante em razão de não necessitar de catalizador e utilizar baixas temperaturas para o processo de síntese do epóxido, tornando a operação mais viável economicamente (HWANG et al., 2003).

Algumas espécies oleaginosas (Soja, Girassol, Mamona, Algodão, Colza e Palma) por exemplo, já são de domínio tecnológico; possuem histórico de pesquisa nas áreas de produção de óleos para indústria metalmeccânica e de agroenergia. Já Moringa, Pinhão manso e Tungue são espécies que ainda demandam estudos. Esta falta de informações tem sido objetivo de novas pesquisas visando estudar outros óleos vegetais para o desenvolvimento de produtos mais sustentáveis, sendo assim, o presente trabalho tem como foco estudar o potencial lubrificante dos óleos de base vegetal (moringa, pinhão

manso e tungue), para o setor metal mecânico, visando obter maiores conhecimentos tecnológico, dando uma parcela de contribuição para a sociedade.

A *Moringa oleifera* Lam, planta pertencente à família das *Moringaceae*, é nativa da Índia é amplamente cultivada nos trópicos de todo o mundo (MADRONA, 2009).

No Brasil foi introduzida como planta ornamental por volta de 1950 e desde então, tem sido difundida devido ao seu alto valor nutricional, principalmente em relação às folhas, que são importantes fontes de vitamina A, C e ferro (BARRETO et al., 2009).

É uma planta que tem um grande potencial para a produção de biocombustível no semiárido nordestino, pois é uma árvore que não apresenta dificuldades quaisquer que sejam os métodos escolhidos para a sua propagação, pode ser pelo plantio direto, produção de mudas a partir de sementes ou de estacas. Adaptam-se bem as condições climáticas tanto do clima semiárido como subúmido, não sendo necessários altos volumes pluviométricos por ano, é tolerante à seca (ESPLAR, 2006).

A moringa, possui de 35% a 40% de óleo em sua semente, apresenta como uma grande promessa para o desenvolvimento de produtos lubrificantes, pois se adapta a diversas condições climáticas e ainda não possui um mercado muito bem delineado (OLIVEIRA et al., 2012). A Figura 21 mostra a árvore com vagens e sementes secas da moringa.



**Figura 21 - (a) árvore da moringa com vagens; (b) sementes secas.
Fonte: Aguiar et al. (2008).**

A versatilidade da árvore é notável, possuindo significativa importância econômica na indústria e medicina, pois todas as partes podem ser consumidas de alguma forma pelo homem. O óleo obtido das sementes da moringa pode ser considerado um óleo

nobre usado no preparo de alimentos; alguns dos usos para a moringa incluem: a produção de biomassa, forragem para animais, agente de limpeza doméstica, fertilizantes, nutriente foliar, goma, suco clarificador de mel e açúcar de cana (FUGLIE et al., 1999).

Grande é a importância da moringa que é também conhecida por muitos como "árvore da vida", da "eterna juventude" ou "liberdade".

O óleo de Moringa apresenta elevado teor de ácidos graxos insaturados, sendo predominante o ácido oleico: apresenta elevado ponto de fulgor e uma maior resistividade à oxidação, seja a altas temperaturas ou em condições ambientes, garantindo a ele também uma boa estabilidade oxidativa (ABDULKARIM, 2007).

Nos experimentos de *Reichert test*, os óleos vegetais in natura (Moringa e Pinhão manso), apresentaram uma boa capacidade de lubrificação, conforme análises das áreas de desgaste dos pinos (ou áreas das elipses) quando comparadas com água (GONÇALVES et al., 2014).

A Figura 22 mostra as áreas desgastadas obtidas após os ensaios, respectivamente, com água, moringa e pinhão manso.

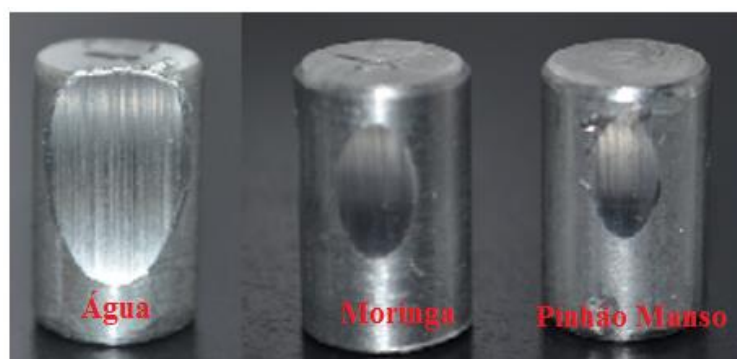


Figura 22 - Área de desgaste após ensaios com Água, Moringa e Pinhão Manso.

Fonte: Gonçalves et al. (2014).

Pinhão manso (*Jatropha Curcas*) é uma espécie perene e monóica, pertencente à família das Euforbiáceas, a mesma da mamona (*Ricinus sp.*) e seringueira (*Hevea spp.*). Acredita-se que a *Jatropha* seja originária da América Central, porém sua vegetação ocorre espontaneamente em diversas regiões do Brasil (HELLER, 1996).

O pinhão manso é uma espécie nativa com forte resistência à seca, solos pouco aproveitáveis e em áreas inviáveis para o manejo de máquinas, sendo uma cultura viável

para pequenas propriedades rurais com mão de obra familiar, tornando-se uma alternativa de fonte de renda para a região norte do Brasil. Configura-se também como uma cultura opcional para produção de óleo com fins energéticos. Sendo assim uma alternativa de inserção de renda para as pequenas propriedades rurais da região do sertão nordestino (CARDOSO, 2012).

As sementes de *Jatropha curcas* não são comestíveis e contém diversos componentes tóxicos tais como ésteres de forbol, curcina, inibidores de tripsina, lectinas, fitatos. São formadas por uma casca dura que representa aproximadamente 37% de seu peso total e por uma amêndoa branca e suave que representa os 63% do peso restante. Quando secas, as sementes apresentam em torno de 7% de umidade e contém de 32 a 40% de óleo, com média de 34% (PUTTEN et al., 2009). A Figura 23 mostra a) frutos verdes; b) frutos secos.



**Figura 23 - (a) Frutos verdes; (b) Frutos secos do Pinhão Manso.
Fonte: Pinhão Manso (2016).**

Quando retirado o óleo, o bagaço que sobra pode ser utilizada como adubo para recuperação de solos, pois é rico em NPK (Nitrogênio, Fósforo e Potássio) e a casca na fabricação de papel ou como carvão vegetal, destinado a produção de energia (MELO et al., 2006).

Algumas espécies oleaginosas possuem um vasto histórico de pesquisa nas áreas de produção de óleos e de agroenergia. As culturas de Soja, Girassol, Mamona, Algodão, por exemplo são espécies com tecnológico bastante avançada. Já a Moringa, Pinhão manso, Tungue, são espécies que ainda demandam, um longo caminho a ser percorrido. Este desconhecimento ou pouco conhecimento, tem sido foco de novas pesquisas e vem

objetivando o estudo de outros óleos vegetais para o desenvolvimento de produtos sustentáveis, que causem menor impacto ambiental para o setor metalomecânico.

Nos testes, utilizando a refrigeração por MQL, notou-se que o consumo energético para cortar o material ferroso também foi menor quando utilizado o lubrificante natural, principalmente os óleos de Moringa e Pinhão manso com maior presença de ácidos graxos insaturados. Esse potencial de lubrificação também refletiu no acabamento superficial das peças apresentando menores valores de rugosidade média (SOUZA et al., 2012).

Gonçalves (2013) em seu trabalho, constatou que quando comparado ao óleo vegetal à base de Canola, óleo semissintético e ao óleo sintético nas operações de fresamento, furação e rosqueamento, com materiais de liga de alumínio e ferro fundido cinzento FC250, o óleo de base de Pinhão manso apresentou melhores resultados, principalmente em situações onde existem a necessidade de um nível maior de lubrificação.

Nos testes, utilizando a refrigeração por MQL, (mínima quantidade de lubrificantes) notou-se que o consumo energético para cortar o material ferroso também foi menor quando utilizado o lubrificante natural, principalmente os óleos de Moringa e Pinhão manso com maior presença de ácidos graxos insaturados. Esse potencial de lubrificação também refletiu no acabamento superficial das peças apresentando menores valores de rugosidade média (SOUZA et al., 2012).

O tungue é nativo da Ásia, onde é cultivado na China. É plantado comercialmente também na América do Sul, nos Estados Unidos e na África. "Tungue" significa na língua chinesa "coração", nome inspirado no formato das folhas dessas plantas (GRUSZYNSKI, 2002).

A sua dispersão pelo mundo ocorreu principalmente no século XX pós-guerra, devido ao interesse no óleo. Há registros de ocorrências em todos os continentes, no entanto, países como China, Estados Unidos, Paraguai, Argentina, Brasil, Austrália e alguns países do leste Asiático possuem produção expressiva (ÀVILA, 2010).

Os dados do IBGE (2014) indicam que as microrregiões de Caxias do Sul e Guaporé, concentraram a totalidade da produção brasileira com 160 t e 65 t respectivamente. Dentre os municípios, Fagundes Varela se destaca como o maior produtor de tungue com produção de 110 t/ano, seguido de Cotiporã e São Valentim do Sul, com 44 t/ano e 40 t/ano, respectivamente.

Há potencialidade de produção também em outros locais, entre eles, o estado do Paraná. A cultura é indicada para o cultivo em áreas consideradas impróprias para as culturas anuais, principalmente em solos pedregosos e com topografia mais acidentada (GOLFETTO et al., 2011).

O tungue destaca-se como uma espécie que apresenta um alto teor de óleo em sua composição, despertando grande interesse da indústria para a produção de biodiesel (Nava et al., 2009). O teor de óleo presente nas amêndoas do tungue varia conforme as espécies, onde a *Aleurites fordii* e *A. montana*, apresentam teores de 57% e 40 % respectivamente.

O óleo de tungue é utilizado, principalmente, devido ao seu poder secativo, tendo muitas aplicações industriais, tais como: na manufatura dos vernizes, das resinas, do couro artificial, sendo aplicado nas pinturas artísticas, nas tintas industriais, na proteção da madeira, usado também para revestir recipientes para alimentos, bebidas, fios elétricos e outras superfícies metálicas. Portanto é uma cultura que tem sua produção e comercialização estruturada (GOLFETTO et al., 2011).

A torta do Tungue contém aproximadamente 25% de proteína, porém não pode ser utilizado para a alimentação animal devido à presença de compostos tóxicos. Desta forma, juntamente com as cascas e o farelo residual, são utilizadas como fertilizante (BOCKISCH, 1998).

Na Figura 24 pode ser visto o fruto do tungue, a) ramos e frutos, b) fruto cortado e sementes.

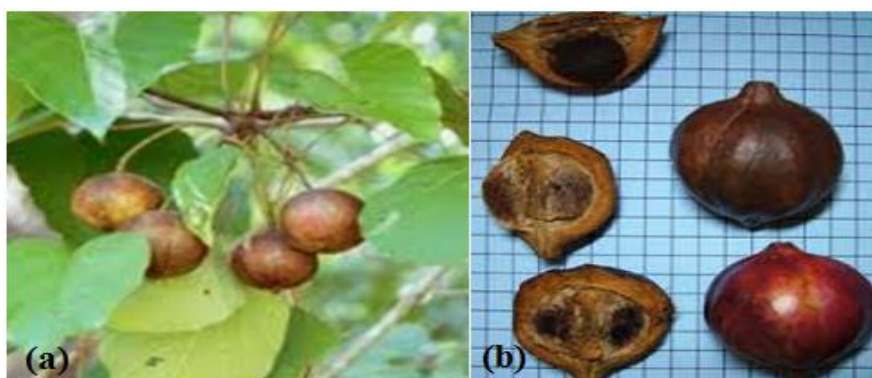


Figura 24 - Fruto do Tungue: (a) ramos e frutos; (b) frutos e sementes.
Fonte: Ávila (2010).

O óleo de tungue distingue-se de outros óleos vegetais pelo elevado teor de ácido α -eleosteárico presente em sua composição. Este ácido graxo possui uma cadeia poliinsaturada com três duplas ligações conjugadas nos carbonos 9, 11 e 13, como mostra a Figura 25. O ácido α -eleosteárico corresponde por aproximadamente 80% do total de ácidos graxos presentes no óleo de tungue, o que lhe confere propriedade de secagem rápida diferenciada e única entre os óleos vegetais existentes (GIRARDI, 2015).

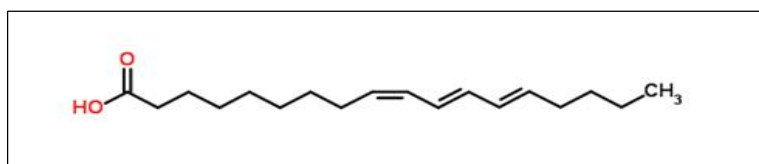


Figura 25 - Ácido cis, trans, trans, 9, 11, 13, octadecatrienóico.
Fonte: Chemspider (2014).

Apesar do grande potencial de produção do Tungue, fica evidente a necessidade de se buscar novas aplicações para esta matéria-prima.

Com o intuito de buscar uma oleaginosa alternativa para a produção de lubrificantes para a indústria metal mecânica de base vegetal, que não faça parte da cadeia alimentar humana ou animal e que tenha preocupações relacionadas à saúde ambiental, justiça social e viabilidade econômica, e que ainda possua boa produtividade, optou-se pelos estudos sobre o óleo de Tungue, Moringa e Pinhão manso. A Tabela 2 apresenta os valores de avaliação Físico-química dos fluidos.

Tabela 2 - Características físico-químicas dos óleos de pinhão manso, moringa e mineral (Avaliação Físico-química).

Características físico-químicas	Pinhão manso	Moringa	Tungue
Teor de ácido graxo livre (com ácido oleico%)	0,96	0,40	4.0-10.0
Índice de saponificação (mg KOH/g)	128	122,81	169.39
Índice de iodo (cg Iodine /g)	106,10	85,70	160-175
Viscosidade a 40°C (cST-mm ² /s)	36,3	33,24	25.10
Índice de acidez	2,0	1,8	7.38

Fonte: Gonçalves et al. (2014).

A presença dos ácidos graxos insaturados está diretamente ligada à estabilidade oxidativa do produto. Quanto maior a presença no óleo, menor é sua estabilidade química, indicando maior propensão à oxidação. Por outro lado, sua presença indica melhor desempenho de lubrificação, requisito essencial para o setor metal mecânico. A porção de ácidos graxos.

Produtos à base de óleos vegetais são constituídos de cadeias longas de carbono e grande quantidade de ácidos graxos insaturados, características essenciais para um bom biofilme estável e com alto poder de lubrificação. A formação de uma película lubrificante garante um menor atrito da peça-ferramenta e conseqüentemente, um menor desgaste da ferramenta de corte (STOETERAU, 2004; MANG e DRESEL, 2007).

A elevada quantidade de ácidos graxos livres indica alto grau de deterioração do produto e elevada acidez, evidenciada pela hidrólises de triglicerídeos (GONÇALVES, 2013), quanto maior o número de insaturações dos ácidos graxos, menor também será seu ponto de fusão e menor será a sua estabilidade à oxidação.

A quantidade de ácidos graxos insaturados presentes nas amostras, abre oportunidade para utilização de recursos naturais e renováveis, onde a indústria pode tornar seu processo de manufatura mais sustentável, utilizando menores quantidades de recursos não renováveis como os derivados do petróleo, como também tornar o ambiente fabril menos perigoso a saúde dos trabalhadores.

A reação de saponificação é aquela em que um éster reage em meio aquoso com uma base forte, ou seja, é uma hidrólise alcalina. Os produtos formados são um sal e um álcool, de modo simplificado.

Uma das evidências de estar ocorrendo a reação de saponificação pode ser observada com a liberação de calor quando os reagentes são colocados em contato e há a percepção de que estão reagindo. Há uma transformação das substâncias que se encontravam em fase líquida e passam a resultar em um produto sólido. Segundo Ribeiro e Seravalli (2004), a reação de saponificação pode verificar as propriedades de óleos e gorduras vegetais, bem como estabelecer seu grau de deteriorização e a estabilidade.

O índice de saponificação demonstra a presença de óleo de alta proporção de ácido graxos e de baixo peso molecular, em mistura com outros óleos. Quando menor e o peso molecular do ácido graxo, maior será o índice de saponificação. O índice de iodo mede o grau de insaturação dos ácidos graxos. Quanto maior o índice de acidez, mais fácil é a formação de sabões.

Quanto menor o peso molecular do ácido graxo, tanto maior será o índice de saponificação, de maneira geral pode se dizer que as gorduras vegetais, quanto mais altos os índices de saponificação mais se prestam para fins alimentares (MORETTO e FETT, 1998).

O índice de iodo está relacionado às reações de halogenação que parte de um princípio de que cada dupla ligação presente em ácidos graxos insaturados pode facilmente reagir com dois átomos de halogênio (cloro, bromo ou iodo, por exemplo), produzindo derivados trans-saturados.

Segundo Maia (2006), quanto maior o índice de iodo, maior o número de duplas ligações (insaturações) presentes no óleo, sendo assim, há uma maior probabilidade da amostra ser considerada um óleo do que uma gordura, pois, é sabido de que os óleos possuem um maior grau de insaturação do que as gorduras, o que justifica elas serem sólidas à temperatura ambiente (25°C). O índice de iodo de uma determinada amostra é geralmente descrito como uma faixa de valor, ao invés de um número fixo, porque o grau de insaturação pode variar sazonalmente ou em função de diferentes processamentos do óleo.

A importância de determinar o índice de iodo é que através dele podemos determinar o teor de ácidos graxos insaturados, medir a susceptibilidade à rancidez oxidativa, controlar o processo de hidrogenação e verificar adulterações em óleos e gorduras.

Segundo Gonçalves (2013), em análises do índice de iodo, de peróxido e de acidez evidenciam a ocorrência de reações químicas durante o aquecimento do óleo nos experimentos de *Reichert test*, os óleos vegetais in natura (Moringa e pinhão).

A viscosidade de um fluido mede a resistência interna oferecida ao movimento relativo das diferentes partes desse fluido (resistência ao fluxo). Conhecer e controlar essa propriedade é muito importante na formulação e preparação de emulsões, cremes, géis, soluções, entre outros (SHAMES, 1999). No processamento de alimentos, a viscosidade é importante nas questões de escoamento de alimentos fluidos, agitação e mistura, perda de carga em tubulações e taxas de evaporação.

Segundo Runge e Duarte (1990) os requisitos necessários para que o fluido de corte possa refrigerar eficientemente a região de corte, são: valores baixos de viscosidade, boa capacidade de molhabilidade e alta capacidade de absorção de calor. Já para uma lubrificação eficiente, os fluidos devem apresentar boa resistência a pressões e

temperaturas elevadas sem vaporizar, boas propriedades antifricção, menor coeficiente de atrito e viscosidade adequada. A viscosidade deve ser suficientemente baixa, de modo a permitir uma fácil circulação do fluido e alto o suficiente para que se tenha uma boa aderência do fluido às superfícies da ferramenta (SOUZA et al., 2009).

Um elevado índice de acidez indica que o óleo ou gordura está sofrendo quebras em sua cadeia lipídica, liberando seus constituintes principais (ácidos graxos), por isso, o cálculo deste índice é de extrema importância na avaliação do estado de deterioração de alimentos que contenham lipídios em sua composição, avaliando o estado de rancidez hidrolítica no qual o óleo/gordura se encontra. O índice de acidez corresponde à quantidade em mg de hidróxido de sódio (NaOH) necessária para neutralizar os ácidos graxos livres presentes em 1 g de gordura. Quanto maior for o índice de acidez, maior volume de base será consumida.

A determinação da acidez pode fornecer um dado importante na avaliação do estado de conservação do óleo. Um processo de decomposição, seja por hidrólise, oxidação ou fermentação, altera quase sempre a concentração dos íons hidrogênio. A decomposição dos glicerídeos e acelerada por aquecimento e pela luz, sendo a rancidez quase sempre acompanhada pela formação de ácidos graxos livres. Estes são frequentemente expressos em termos de índice.

2.6.3 Desenvolvimentos de um Fluido de Corte de Base Vegetal

Para o desenvolvimento de um fluido de corte de base vegetal as ações devem ser divididas nas seguintes etapas: mostrado na Figura 26. O primeiro critério de seleção é que o vegetal tenha um alto teor de óleo em sua constituição e demanda de mercado. A seleção foi fundamentada no requisito do vegetal não ocupar áreas empregadas para produção de alimentos.

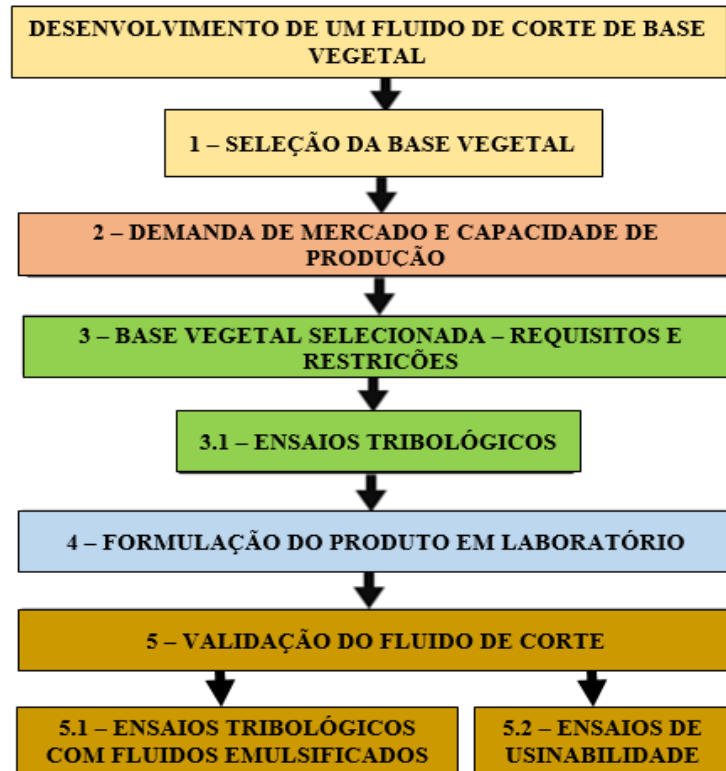


Figura 26 - Sequência para o desenvolvimento de fluido de corte de base vegetal.

Fonte: Autoria própria.

Em projeto de obtenção de um novo fluido de corte é relevante entender os processos triboquímicos e tribofísicos que ocorre entre o material e a ferramenta de corte, além de ter compreensão dos elementos que influenciam nos processos de usinagem e que ajudam na avaliação dos fenômenos físicos químicos que ocorrem quando dois corpos estão em contato deslizante (GONÇALVES, 2013).

Para o desenvolvimento e avaliação do desempenho dos fluidos de corte, os ensaios tribológicos são alternativas iniciais de análise na etapa de concepção dos fluidos de corte, essa etapa permite uma maior flexibilidade para alteração da formulação onde são obtidas informações sobre lubricidade, efeitos de aditivos, detergência, habilidade de estabelecer uma resposta térmica, tensão superficial, sólidos dissolvidos e oscilação da temperatura na superfície de contato (CARDOSO et al., 2013).

Nesta etapa, é necessário considerar se os componentes escolhidos para compor a fórmula do fluido de corte não são problemáticos, às considerações dos aspectos ambientais dos fluidos de corte devem ser focadas, principalmente nos danos à saúde e aos recursos hídricos. Muitos produtos químicos usados na composição dos fluidos de

corte, como biocidas, anticorrosivos, umectantes, antiespumantes e outros aditivos podem ter efeitos nocivos sobre o homem e o ecossistema.

2.6.4 Seleção do Óleo de Base Vegetal

O Brasil é um país que por sua extensão territorial, área geográfica e clima tropical, favorece o cultivo de uma diversidade de oleaginosas para a produção de óleos vegetais. Entre as culturas oleaginosas, o tungue pinhão manso e moringa apresenta como uma alternativa.

São vegetais que por não ocupar áreas agrícolas não apropriadas para culturas de alimentos, portanto pode trazer oportunidade de inserção e renda para médios e pequenos agricultores que empregam mão de obra familiar e também por ser uma cultura que não faz parte da cadeia alimentar humana ou animal (EMBRAPA CLIMA TEMPERADO, 2012).

A produção das bases vegetais, pode ser enquadrada em um sistema sustentável de agricultura, definida como modelo de agricultura, que está comprometida com a natureza sistêmica da produção de alimentos, forragens e fibras, equilibrando, com equidade, preocupações relacionadas à saúde ambiental, justiça social e viabilidade econômica, entre os diferentes setores da população (GOLFETTO, 2011).

Neste sentido, estas culturas demonstram ser uma alternativa importante para a geração de empregos e renda como também para o desenvolvimento social de pequenos e médios agricultores.

É preciso buscar soluções sustentáveis, que atendam os diversos interesses. Com a redução dos custos de produção, a partir de novas alternativas que seja eficaz e com baixo custo atendendo aos princípios básicos das empresas.

2.6.5 Demanda de Mercado e Potencial de Produção

Com base em levantamento bibliográfico, o pinhão manso, moringa e tungue têm se destacado como espécies que apresentam significativos teores de óleo em sua composição, despertando grande interesse da indústria para a produção de agroenergia.

2.6.6 Base Vegetal Seleccionada

Algumas espécies oleaginosas possuem um vasto histórico de pesquisa nas áreas de produção de óleos para indústria metalmeccânica. Já o tungue, o pinhão manso e a moringa são espécies que ainda demandam estudos para predizer sua aplicação com fluidos de corte.

A motivação do presente trabalho é buscar maiores informações sobre o potencial lubrificante dos óleos de pinhão manso, de tungue e de moringa para o setor metalomeccânico, visando adquirir maiores conhecimentos tecnológicos.

A seleção dos vegetais não se deu apenas em decorrência dos resultados preliminares que apresentaram uma boa capacidade de lubrificação nos experimentos de *Reichert test*, conforme analisado e na área da elipse comparados com água, óleo mineral, em estudos realizados (GONÇALVES et al., 2014; CARDOSO e SOUZA, 2016).

Os elementos que pesaram na escolha da base vegetal foi a demanda de mercado (facilidade de se encontrar), o custo por litro do óleo e o seu rendimento. Que no caso inviabilizou continuar os experimentos com o óleo de moringa, mesmo os resultados dos ensaios tribológicos sendo tão bons.

2.7 Ensaios Tribológicos

Estudos sobre as reais condições de uso do material assim como as informações sobre o coeficiente de atrito, taxa de desgaste e durabilidade da película de lubrificantes,

são características atribuídas aos ensaios tribológicos. Estes estudos podem ser aplicados em diversas áreas dos setores produtivos.

À partir dos ensaios tribológicos por meio do *Reichert Test* pode-se avaliar o comportamento da base vegetal selecionada utilizado para ensaios de desgaste, que consiste em proporcionar um atrito entre um anel de metal duro e um pino de aço para a realização do experimento. Foi uma técnica de ensaio importante para estudar as propriedades tribológicas dos materiais e a interação de fluidos lubrificante com diversos tipos de materiais. Ao final dos ensaios tribológicos constatou-se a boa capacidade de lubrificação dos fluidos de base vegetal quando analisado a área da elipse, perda de massa e temperatura do fluido e corpo de prova valores estes semelhante a base vegetal de pinhão manso.

Segundo Cardoso (2013), a capacidade de lubrificação do fluido testado está diretamente ligada a área da elipse e a perda de massa, ou seja quanto melhor for o potencial de lubrificação do fluido testado, menor será a área da elipse. Uma vez pré-avaliado o poder de lubrificação de um óleo vegetal, este pode seguir para outras etapas de desenvolvimento de novas formulações de lubrificantes.

2.7.1 Validação do Fluido de Corte

Validação do fluido de base vegetal corresponde à validação do fluido formulado, utilizando o método da qualificação de uma fluido de corte conforme as etapas estabelecido neste trabalho, sendo que a fase inicial do fluido foi submetido aos ensaios tribológicos tanto na fase in natura do óleo como na fase emulsificada, posteriormente, submetido aos ensaios de usinabilidade na forma de emulsão.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho, os procedimentos experimentais estão divididos em duas etapas:

- a) Construção e adaptação de uma máquina simuladora de desgaste para ensaios de lubrificantes e avaliação do comportamento dos fluidos;
- b) Ensaios com óleos previamente ensaiados na máquina de desgaste e avaliação do comportamento dos fluidos em um processo de fresamento.

3.1 Construção e Adaptação de um Tribômetro do Tipo *Reichert Test*

Para o desenvolvimento do experimento com fluidos de base vegetal de pinhão manso moringa e tungue; neste trabalho, inicialmente realizou-se um estudo das possibilidades de fabricação de dispositivo em questão, onde optou-se, pelo desenvolvimento e construção de uma máquina baseada no método *Reichert Test*, com alterações, tais como: adaptação de um sensor próximo da área de contato entre pino e anel para aquisição de temperatura do corpo de provas e sensor para aquisição de temperatura dos fluidos. Para construção e adaptação do equipamento foi possível contar com a colaboração de alunos estagiários do curso de engenharia mecânica e também foram utilizadas máquinas-ferramentas do laboratório de usinagem da UTFPR - Câmpus Cornélio Procópio. A Figura 27 apresenta o tribômetro do tipo *Reichert Test* com adaptações para aquisição das temperaturas.

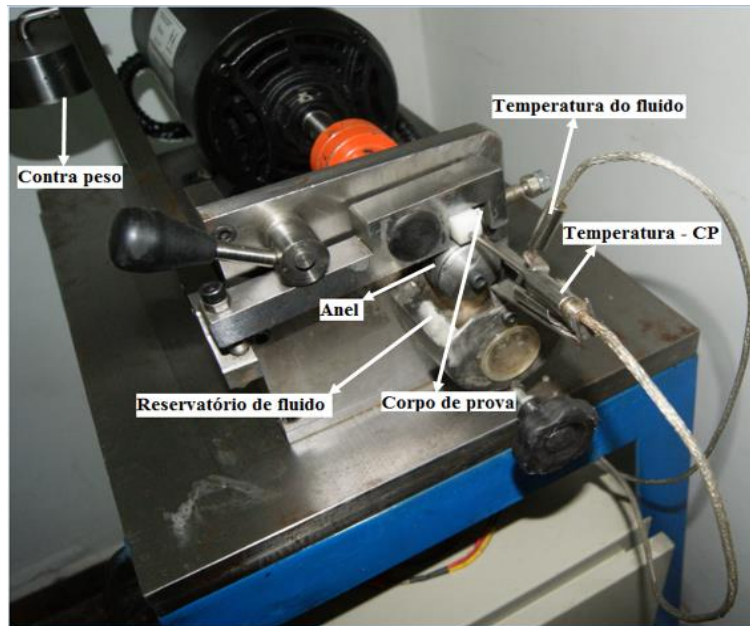


Figura 27 - Conjunto montado com adaptações de termopares para aquisição de temperaturas do corpo de provas e temperaturas dos fluidos.

Fonte: Autoria própria.

3.2 Experimento Tribológico

Para realização do ensaio por meio do *Reichert Test*, utilizou-se a aplicação de diferentes fluidos: óleo vegetal de pinhão manso, moringa, tungue in natura e água posteriormente os fluidos vegetais emulsificados. Elegeu-se os óleos de pinhão manso e moringa para ser comparado com o óleo de tungue, pois em estudo preliminar realizados anteriormente, observou-se o bom potencial de lubrificidade que os óleos de base vegetal de pinhão manso e moringa desempenharam com melhor papel de lubrificante, mesmo estando no estado, sem qualquer forma de aditivação em sua composição, quando comparado com água, resultados semelhantes alcançado pelo grupo de estudo (GONÇALVES et al., 2014; LUTIF et al., 2015).

Todavia, e como já foi anteriormente referido, os ensaios com a base vegetal de moringa por meio do *Reichert Test*, apresentaram resultados satisfatórios, sendo que a maior limitação na escolha e prosseguimentos da base vegetal de moringa para o processo de usinagem, foi a demanda do produto, além dos elevados custos, o que inviabilizou os ensaios de usinagem, que requer altos volumes do óleo vegetal. Dessa forma, a equipe envolvida no projeto decidiu ao invés de fazer a formulação de fluido para uso em jorro

contínuo, optou-se por realizar formulações para uso em MQL (mínima quantidade de lubrificantes) em trabalho posterior, onde o volume de óleo a ser utilizado é significativamente menor comparado ao jorro contínuo.

As diferentes bases vegetais do tipo emulsionáveis: o óleo de pinhão manso foi desenvolvido e caracterizado na tese de doutorado de Gonçalves (2013).

O produto vegetal é composto por anticorrosivos, antiespumantes siloxanos, sabões amínicos, ésteres/gorduras, tensoativos não iônicos etoxilados, aditivos de extrema pressão sulfurizados e biocidas. Já para o óleo de tungue foram adicionados porções de tensoativos e água conforme resultados obtidos nos ensaios de bancada realizado por (CARDOSO e SOUZA, 2016).

Para avaliar a lubricidade dos fluidos pelo ensaio tribológico utiliza-se medir a área da elipse deixada pelo desgaste na superfície do pino.

Verificou-se também as propriedades de lubrificação comparando entre os fluidos, a perda de massa, avaliação por meio de imagem da superfície do pino desgastado e pelo seu aspecto sem a presença de resíduo de materiais na superfície do pino após a conclusão do ensaio.

Os ensaios tribológicos foram realizados com uma sequência pré-estabelecida, conforme mostra a Figura 28.



Figura 28 - Sequência de Ensaio Tribológico de *Reichert Test*.

Fonte: Autoria própria.

1. Verificar a integridade superficial de contato do pino (rugosidade e erro de forma), conforme o estabelecido na norma DIN 50320 (Análise de Sistemas de Processos de Desgaste -1979) tendo como análise final o desgaste do pino.

2. Preparo do fluido: colocar no reservatório de forma que 2/3 do anel (composição do material do anel não é fornecido pelo fabricante) esteja imerso no fluido.

3. Montagem do corpo de prova e verificar a perpendicularidade do pino em relação ao anel para garantir a manutenção do pino na posição central na superfície do anel.

4. Execução dos ensaios:

Acionar o *Reichert Test*; estabelecer o tempo de dois minutos de modo a estabilizar o movimento do eixo árvore, garantindo que o mesmo arraste um filme de lubrificante no contato do pino com o anel.

4.1 Os ensaios foram realizados com tempo, carga, velocidade e quantidade de lubrificante constante para todos os fluidos. Para cada um dos fluidos foram

testados um anel e dois pinos perfazendo um total de oito repetições para cada fluido; ao trocar o fluido, o anel também era substituído. Essas variáveis do processo foram selecionadas segundo norma ASTM G 99 - 95a (*Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus*). Os testes foram realizados mediante consulta bibliográfica e também em razão dos resultados serem comparativos entre os fluidos. O número de execuções para cada pino foram escolhidos de acordo com pré-testes de modo que uma área de desgaste não comprometessem a outra, desta forma, foram quatro ensaios para cada pino. Para cada face desgastada, foi girado o pino a 90°, no sentido horário, estabelecendo assim uma sequência no sentido horário nas faces desgastadas, de modo que as quatro elipses fossem distribuídas de forma equidistante.

Os ensaios foram realizados por um tempo de 60 segundos, empregando uma velocidade de deslizamento de 1,3 m/s. A quantidade de lubrificante de 50 ml sendo este, determinado pela capacidade do reservatório do sistema, ou seja, escolhidos de forma que o sistema fornecesse a lubrificação constante ao corpo de prova.

4.2 Para aquisição dos dados de temperatura foi adaptado um dispositivo que consiste de uma placa módulo USB de aquisição de dados multifuncional com isolamento - tensão / temperatura, interligado a um computador por meio USB que foi possível captar os dados utilizando o programa LabVIEW.

Para avaliar o padrão de calor ou oscilação de temperatura no corpo de prova na interface de contato pino/anel e temperatura do fluido, utilizou-se um termopar do Tipo K (-40 a 750°C/-40 a 1382°F), sensibilidade por volta de 55µV/°C. dispositivo interligado a um computador que foi possível captar os dados utilizando um programa no LabVIEW, objetivando analisar a variação da temperatura na região de contato, pino/anel para os diferentes fluidos e também o calor gerado na região atritada que foi transferido para os fluidos.

Para cada face desgastada foi estabelecido um intervalo de tempo, para que a temperatura do corpo de prova e do fluido estabilizassem a uma temperatura entre 30 a 34 °C.

5. Análise dos resultados:

5.1. A temperatura para cada um dos fluidos, e temperatura do corpo de provas, foram tabulados em planilhas as quais geraram os gráficos das temperaturas.

5.2. Para o controle das perdas de massa, foi utilizado uma balança semi-analítica de fabricação: Marte Científica, série UX-4200H, com resolução de 0,01 g, do laboratório de materiais da UTFPR – Câmpus Cornélio Procópio; ao final de cada face desgastada, foi pesado o corpo de prova e subtraído os valores das perdas de massa, posteriormente lançado em planilhas as quais geraram os gráficos de perda de massa.

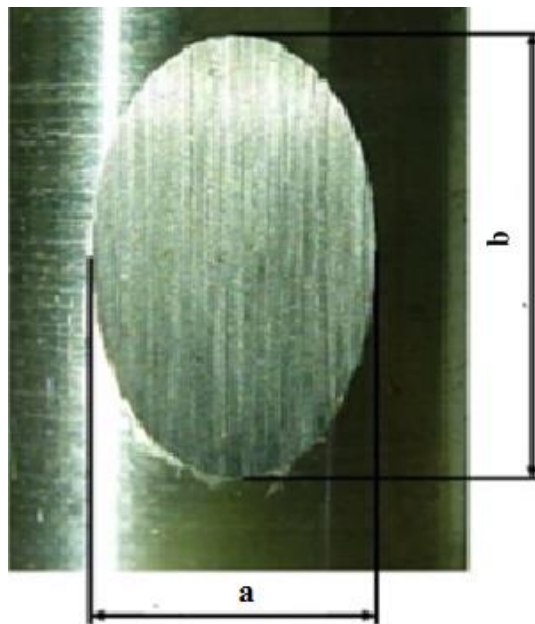
5.3. Para medir a área desgastada do pino, foi utilizado um microscópio digital portátil da marca Dino-Lite Pro modelo AM-313 T com ampliação de até 200 x com o auxílio do software; Dino Capture 2.0.

5.4. O próximo item a ser avaliado, foi as condições residuais encontradas no pino (análise visual e fotografada) e posteriormente, aspecto de limpeza das faces desgastada e rebarbas.

5.5. Os cálculos das áreas de desgaste do pino, apresentado na forma de elipse, foram realizados pela equação:

$$A = \pi * a * b \quad (1)$$

A - área da elipse; a) área menor; b) - área maior do desgaste, mostrado na Figura 29.



**Figura 29 - Região do pino onde sofreu desgaste, geometria utilizada para os cálculos da elipse.
Fonte: Autoria própria.**

5.6 Para analisar os mecanismos de desgastes dos corpos de provas, foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura (MEV) marca Zeiss, modelo EVO-MA 15 do laboratório de microscopia eletrônica da UTFPR - Câmpus Curitiba. Foram preparados os pinos e anéis, sendo uma face para cada condição ensaiada. Os pino e anéis foram imersas em álcool isopropílico, limpas por ultrassom por 10 minutos e secas com ar quente.

3.3 Ensaios de Usinabilidade

Os ensaios têm como objetivo principal avaliar o desempenho de fluidos de corte emulsionáveis no processo de usinagem por fresamento de ferro fundido CGI. Os critérios de avaliação estão divididos em três análises: desgaste da ferramenta, potência consumida, acabamento superficial. A Figura 30 representa esquematicamente a sequência dos ensaios de usinabilidade do ferro fundido CGI.

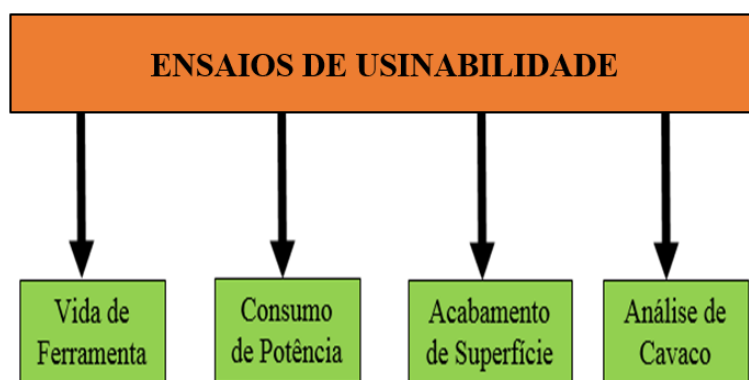


Figura 30 - Representação esquemática da sequência dos ensaios de usinabilidade do ferro fundido CGI para avaliação das propriedades do fluido de corte solúvel.

Fonte: Autoria própria.

Para a realização dos ensaios serão apresentados e descritos os materiais, equipamentos e métodos para os ensaios. Os ensaios de usinagem foram realizados no laboratório de CNC da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR – Câmpus Cornélio Procópio.

3.3 1 Corpo de Provas para os Ensaios

Os ensaios experimentais de usinagem foram realizados com o ferro fundido CGI (ASM, 1996), material este com ampla aplicação na fabricação de blocos de motor.

Os corpos de provas utilizados para realização dos ensaios de usinagem, com dimensões 240 x 180 x 38 mm, objetivando a remoção das superfícies plana e paralela ao plano X e Y da máquina-ferramenta, foram retirados camada de 3 mm de profundidade para remover a crosta oxidada com maior dureza para não comprometer o desgaste prematuro da ferramenta de corte. A Figura 31 mostra as dimensões do corpo de provas.

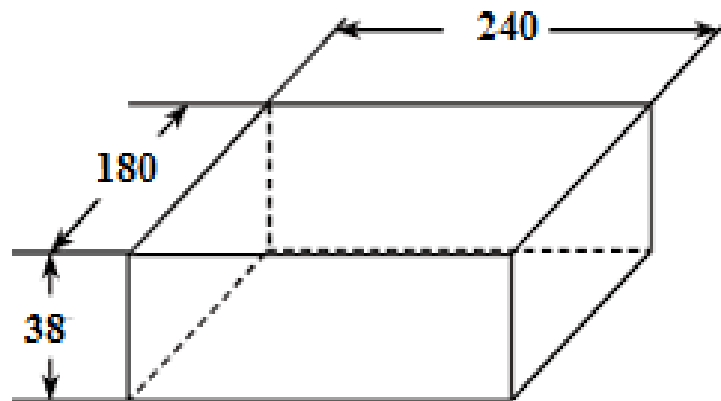


Figura 31 - Dimensões do corpo de provas utilizado nos ensaios de usinabilidade.

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 3 apresenta os valores de propriedades mecânicas do ferro fundido vermicular (CGI).

Tabela 3 - Propriedades mecânicas do ferro fundido vermicular (CGI).

Propriedade	Ferro Vermicular (CGI).
Resistencia à Tração [Mpa]	450
Elasticidade [GPa]	145
Resistencia à Fadiga [Mpa]	200
Condutibilidade Térmica [W/M ² K]	37
Dureza Média [HB]	225

Fonte: Sintercast (2016).

3.3.2 Máquina-Ferramenta

A Figura 32 mostra o centro de usinagem utilizado para realização dos ensaios de usinabilidade.



Figura 32 - Centro de usinagem CNC Romi-D - 600 utilizado nos ensaios de fresamento.

Fonte: Autoria própria.

As características da referida máquina são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Especificações técnicas da máquina-ferramenta, ROMI - D600.

Característica	Característica
Cone do eixo-árvore	ISO 40
Faixa de velocidades	7 a 7500 RPM
Curso da mesa superior (eixo X)	600 mm
Curso da mesa inferior (eixo Y)	530 mm
Curso do cabeçote (eixo Z)	580 mm
Capacidade de ferramentas	20un.
Diâmetro máximo da ferramenta	80 mm
Comprimento máximo da ferramenta	254 mm
Comando Numérico	Fanuc 0i-md
Potência instalada motor principal	20cv
Potência total instalada	30 Kva

Fonte: Adaptado de ROMI (2014).

Antes de iniciar os ensaios, a máquina-ferramenta passou por uma minuciosa limpeza, na qual todos seus componentes; filtros, bombas e tubulações foram limpos por meio de circulação de água e aplicação de biocida, com a finalidade de inibir o crescimento de microorganismos de possíveis bactérias e fungos em emulsões lubrificantes, evitando a rápida degradação do fluido, a quebra da emulsão, formação de subprodutos e a ocorrência de efeitos maléficos pelo contato do homem com as emulsões contaminadas ou seja, eliminados todos os resíduos de fluido ou cavacos.

3.3.3 Ferramentas de Corte

As ferramentas de corte utilizadas para o desenvolvimento dos ensaios, foi o inserto fabricado pela Sandvik ferramentas, codificada como 490R-08T308M-KM, as mesmas possuem 4 arestas de corte, recomendada pelo fabricante para usinagem de ferro fundido.

A Figura 33 apresenta a imagem e o modelo da ferramenta de corte que será utilizada nos ensaios do ferro fundido CGI.

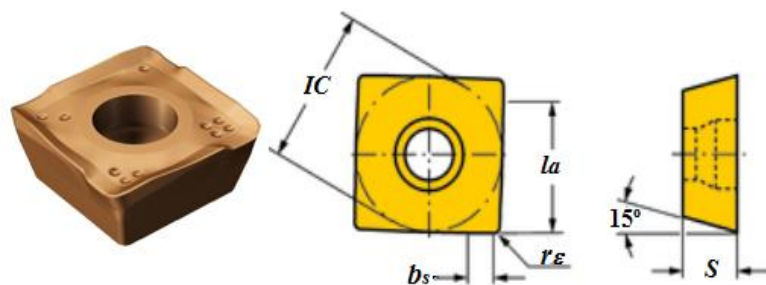


Figura 33 - inserto de metal duro 490R-08T308M-KM.
Fonte: Sandvik ferramenta (2016).

Na execução dos ensaios, serão utilizados um cabeçote de fresar, codificado como CoroMill® 490, cujas características são: diâmetro 63 mm, 06 insertos, corte a direita.

Apenas um dos seis insertos montado, apresentava ação de corte devido ao propósito de submetê-lo a todo o trabalho de fresamento no ensaio de usinabilidade. Os

demais insertos tiveram suas arestas de corte removidas propositalmente, os insertos foram mantidos apenas para auxiliar na manutenção do balanceamento de massas do cabeçote de fresamento.

3.3.4 Fluidos de Corte

Os fluidos de corte utilizados nos experimentos para a usinagem de ferro fundido CGI, foram selecionadas duas diferentes bases vegetais do tipo emulsionáveis: óleo de Pinhão manso e óleo de Tungue. As características físico-químicas do óleo de Pinhão manso e Tungue estão descritas na Tabela 5.

A diluição do fluido de base Pinhão manso foi na proporção de 1 litro de óleo para 40 litros de água.

Na preparação da emulsão da base vegetal de Tungue utilizou-se tensoativo não iônicos, água e óleo de Tungue in natura. Essa formulação de diluição foi resultado de ensaios de bancadas efetuados por CARDOSO E SOUZA (2016) no Centro de Competência em Manufatura (CCM), laboratório de pesquisa localizado no Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA). Essa formulação foi a que apresentou resultados semelhante a diluição do Pinhão manso já que o óleo de Tungue neste trabalho foi comparado sua eficiência com o óleo de Pinhão manso.

Tabela 5 - Propriedades físico-químicas das bases vegetais utilizado nos ensaios de usinagem.

Propriedades físicas e químicas	Dados característicos	
	Pinhão manso	Tungue
Base vegetal	Pinhão manso	Tungue
Estado físico	Líquido turvo	Líquido amarelado a âmbar
Odor	Característico	Característico
Cor visual	Castanho/âmbar a marrom	Gardner
Solubilidade	Solúvel em éster e gorduras	Solúvel em éster
Solubilidade em água	Solúvel em água	Solúvel em água
Densidade (a 20/4°C): g/cm ³	0.8903	0.920-0.938
Índice de refração 25°C a 40 °C	1.468	1.516-1.5260
Ponto de fulgor	240 °C	> 275 °C

Fonte: Cardoso e Souza (2016).

3.3.5 Parâmetros de Corte

Os parâmetros de corte foram definidos por meio das bibliografias pesquisadas trabalhos existente e dados recomendado pelo fabricante da ferramentas. Após os pré-testes foi determinado três repetições de arestas para cada fluido, na intenção de obter os melhores desempenhos para o óleo de pinhão manso e tungue, e aumentar a confiabilidade nos resultados dos ensaios. Os parâmetros utilizados são mostrados na Tabela 6.

Tabela 6 - Parâmetros de corte utilizados.

Parâmetro	CGI: condição - 1 tungue.	CGI: condição - 2 pinhão manso
Velocidade de corte (v_c) m/min	70	70
Avanço (f_z) mm/dente	0,05	0,05
Profundidade de corte (a_p) mm	0,5	0,5
Rotação (n) rpm	1400	1400
a_e	100%	100%

Fonte: Aatoria própria.

3.3.6 Monitoramento da Rugosidade Superficial

Os dados de rugosidade superficial (R_a , R_t , R_z) foram anotados a cada 0,72 m de material usinado em pontos diferentes da face do corpo de prova, sempre no sentido de corte concordante. Os parâmetros a ser utilizados estão baseados na norma da ISO 4287/1997. Os dados foram coletados nos mesmos intervalos da medição do desgaste e potência consumida.

Para medir a rugosidade superficial usinada, utilizou-se um rugosímetro digital portátil da marca Mitutoyo, modelo SJ-201P, visto na Figura 34.

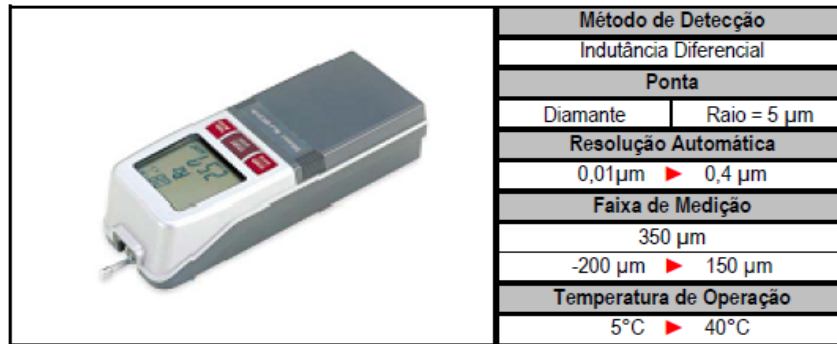


Figura 34 - Informações técnicas do rugosímetro.
Fonte: Mitutuyo (2016).

A Figura 35 mostra as posições dos pontos para medição da rugosidade da superfície usinada nos corpos de prova de ferro fundido CGI.

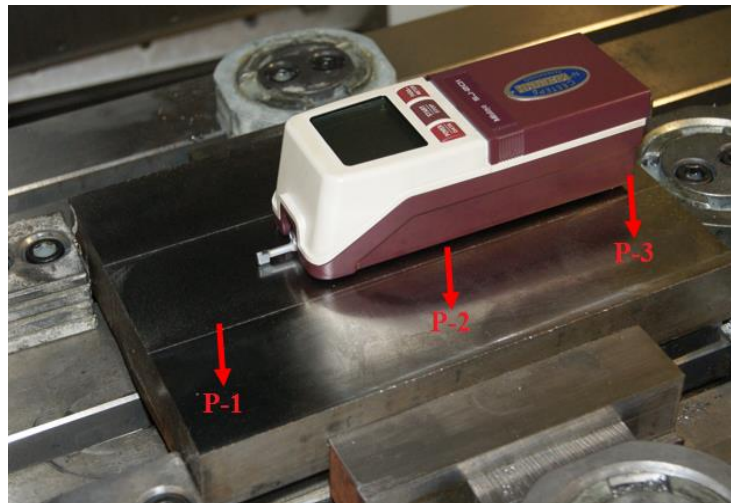


Figura 35 - Pontos de medição da rugosidade superficial.
Fonte: Autoria própria.

3.3.7 Aquisição de Potência Consumida

Para captação dos valores de potência de corte durante os ensaios, foram utilizados um Medidor de Energia e Transdutor Digital de Grandezas Elétricas Mult – K 120 da KRON®. O medidor foi instalado na máquina-ferramenta ROMI D600 e o mesmo foi interligado a um sistema de aquisição por meio do software LabVIEW, o qual forneceu a potência trifásica consumida pela máquina com um intervalo de 1s. Esses dados foram

captados a cada 0,72 m de comprimento de material usinado. Em seguida os resultados foram tabulados em planilhas, gerando os gráficos de consumo médio de potência.

A Figura 36 e a Tabela 7 mostram as características de captação dos valores de potências.

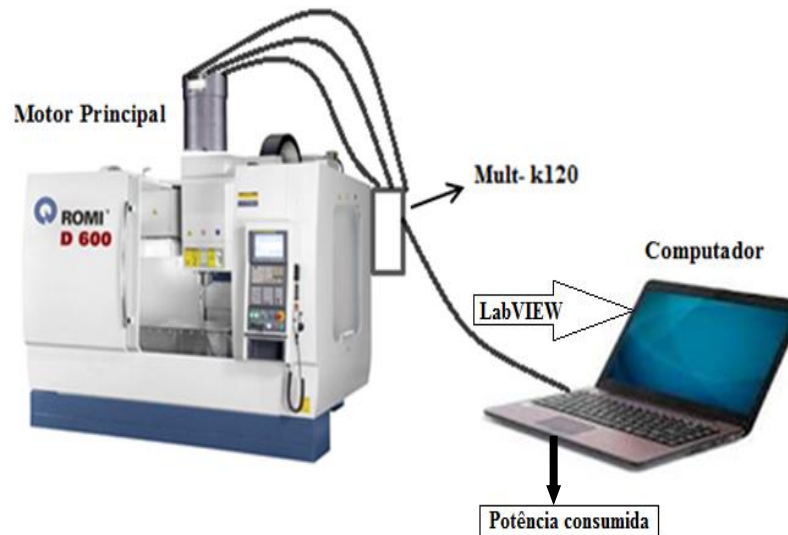


Figura 36 - Esquema da captação do consumo de potência.
Fonte: Autoria própria.

Tabela 7 - Precisão do Instrumento de Energia e Transdutor Digital de Grandezas Elétricas Mult-K 120.

Variáveis	Variáveis
Tensão, Corrente e Potência	0,2%
Frequência	0,1Hz
Fator de potência	0,5%
Energia	0,5%
Distorção Harmônica Total - THD	<3%

Fonte: Adaptado de Souza (2013).

3.3.8 Monitoramento do Desgaste da Ferramenta

A medição do desgaste da ferramenta foi realizado até que as mesmas atingissem o seu limite máximo de $VB_{Bmáx} = 0,200$ mm de desgaste de flanco, determinando seu fim de vida (LUTIF et al., 2014). Esse limite foram determinados com base nas literaturas pesquisadas e na norma ISO 3685/93.

A análise das imagens e monitoramento dos desgastes de flanco da ferramenta de corte, para o ferro fundido CGI; foram utilizados um microscópio digital portátil da marca Dino-Lite Pro modelo AM-313T com ampliação de até 200 x com o auxílio do software para medição Dino Capture 2.0 da UTFPR – Câmpus Cornélio Procópio.

Para analisar os mecanismos de desgastes das ferramentas foram utilizados um microscópio eletrônico de varredura (MEV) marca Zeiss, modelo EVO-MA15 do laboratório de microscopia eletrônica da UTFPR - Câmpus Curitiba.

Foram preparados os inserto de metal duro 490R-08T308M-KM, sendo três arestas para cada fluido ensaiada. Para determinação das composições químicas das ferramentas, após os ensaios, com objetivo de verificar se houve possível difusão do material usinado, foi utilizado espectroscopia de energia dispersiva em ensaio Raios-X (*Energy Dispersive X-ray - EDX*). Este procedimento foi realizado no mesmo microscópio eletrônico por varredura (citado anteriormente), o qual conta com um detector apropriado.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para os ensaios de desgastes por meio do *Reichert Test*, utilizou-se óleos de base vegetal in natura, e posteriormente emulsificado, para avaliar o comportamento. Todos os procedimentos foram especificados no trabalho, de forma iguais para todos os fluidos. A taxa de desgaste, foi o principal critério de comparação entre os diferentes fluidos. Considerando-se os experimentos tribológicos foi possível observar que os óleos vegetais de Pinhão manso e Tungue, apresentaram desempenho satisfatório de lubrificação quando comparado com água aplicado nos ensaios tribológico, uma hipótese, baseada nos trabalhos citados por Gonçalves et al., (2014). Esses resultados positivos possivelmente se deve pela quantidade de ácidos graxos insaturados presentes nos fluidos de base vegetal.

4.1 Ensaios Realizados com Óleos de Base Vegetal In natura

A seguir os resultados da aquisição das perdas de massa, áreas das elipses, temperaturas do corpo de provas e temperaturas dos óleos In natura.

As tabelas A 2 a A 11 com valores dos resultados das perda de massa, área da elipse temperatura do corpo de provas e temperatura dos fluidos para as repetições dos pinos A - 1 e A - 2 podem ser encontrados no Apêndice A.

As Figuras A 1 a A 10 com as imagens e dimensões das faces desgastadas do corpo de prova para os ensaios realizado com óleos In natura, para os pinos A 1 e A 2, podem ser encontrados no Apêndice A.

A Tabela 8 mostra os valores médios das áreas das elipses para os pinos A - 1 e A - 2, para os óleos In natura.

Tabela 8 - Média das áreas (mm²) da elipse dos pinos.

Média das Rep.	Água	Pinhão manso	Tungue
Rep. - 1	48,34	45,53	39,08
Rep. - 2	39,30	37,92	39,07
Rep. - 3	42,31	31,57	39,60
Rep. - 4	40,51	40,50	36,38

Fonte: Autoria própria.

Na Figura 37 observa-se uma certa semelhança nos resultados, sendo que o óleo de Tungue apresentou uma regularidade, com tendência a redução a partir da terceira repetição, já o óleo de Pinhão manso apresentou certa instabilidade com tendência de elevação ao final dos ensaios. No experimento com Água, foi verificada uma área da elipse maior que os demais fluidos; o que demonstra seu baixo poder de lubrificação, isto também ser confirmado nas perdas de massa quando comparados com Pinhão manso e Tungue.

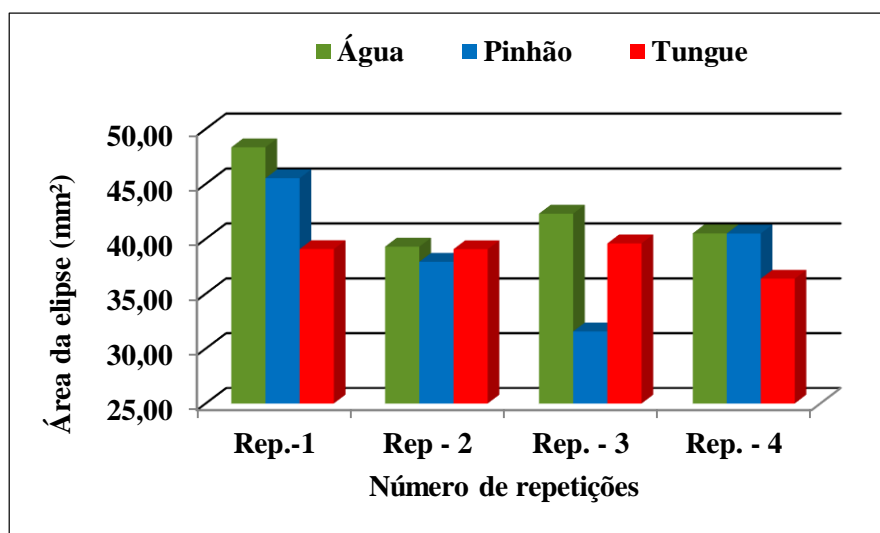


Figura 37 - Médias das áreas das elipse dos corpos de provas para os três fluidos – ensaio *Reichert Test*.

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 9 mostra os valores médios das perdas de massa para os pinos A - 1 e A - 2, para água, óleo de Pinhão manso e Tungue.

Tabela 9 - Média das perdas de massa (g) para os pinos.

Média das faces	Água	Pinhão manso	Tungue
Rep. - 1	0,11	0,11	0,06
Rep. - 2	0,10	0,07	0,07
Rep. - 3	0,09	0,05	0,08
Rep. - 4	0,10	0,09	0,05

Fonte: Autoria própria.

Na Figura 38 observa-se uma semelhança com os resultados anteriores (em termos da área da elipse), sendo que o óleo de Tungue apresentou evolução nas três repetições, com tendência a redução ao final dos testes, com comportamento instável a cada repetição. Já o óleo de Pinhão manso apresentou, declínio até a terceira repetição, com tendência de elevação ao final.

O experimento com Água, apesar de valores elevados, de perdas de massa, apresentou um comportamento estável; com valores de perdas de massa superiores aos apresentados pelos óleos in natura de Tungue e de Pinhão manso.

Foi possível observar que os óleos de base vegetal Pinhão manso e tungue, apresentaram resultados satisfatórios no quesito lubrificação por apresentarem comparativamente menores perdas de massa.

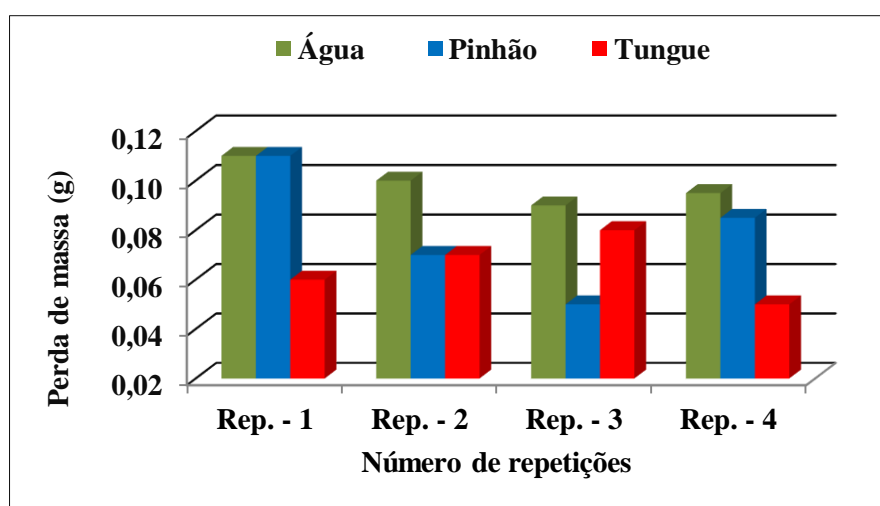


Figura 38 - Médias das perda de massa dos corpos de provas para os três fluidos - ensaio Reichert Test.

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 10 apresenta os valores médios das temperaturas (°C) dos corpos de provas para os pinos A - 1 e A - 2, para a Água, óleo de Pinhão manso e Tungue.

Tabela 10 - Temperatura média (°C) dos corpos de provas.

Média das Rep.	Água	Pinhão manso	Tungue
Rep. - 1	31,77	36,95	44,11
Rep. - 2	33,60	40,02	47,28
Rep. - 3	35,29	42,86	49,57
Rep. - 4	37,01	45,32	51,14

Fonte: Autoria própria.

Na Figura 39, observa-se que a elevação da temperatura a partir da primeira repetição manteve uma proporcionalidade entre os fluidos. A capacidade lubrificante e refrigerar são de grande importância, pois reduzem a ocorrência de danos na zona de atrito. Em uma das funções importantes no desempenho dos óleos lubrificantes, nas mais diversas aplicações, é a de arrefecer onde observou-se que os óleos de base vegetal; Pinhão manso e Tungue, apresentaram os piores desempenhos no quesito troca de calor, quando comparados com a Água. A Água foi o fluido que apresentou o melhor desempenho, apresentando, maior potencial de refrigeração, sendo determinante na troca de calor entre o corpo de provas e o fluido, seguido pelo pinhão manso; o Tungue ficou com o pior desempenho no quesito troca de calor.

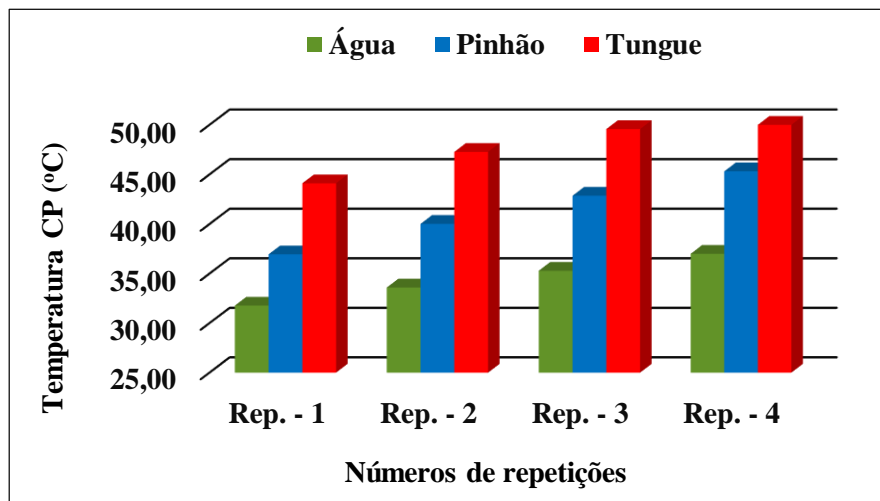


Figura 39 - Médias das temperaturas dos corpos de provas para os três fluidos - ensaio *Reichert Test*.

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 11 apresenta os valores médios das temperaturas (°C) dos fluidos para os pinos A - 1 e A - 2, para a Água, óleo de Pinhão manso e Tungue.

Tabela 11 - Médias das temperatura (°C) dos fluidos.

Média das faces	Água	Pinhão manso	Tungue
Rep. - 1	43,62	38,23	34,37
Rep. - 2	46,70	42,91	37,54
Rep. - 3	49,49	47,36	40,81
Rep. - 4	52,17	50,73	43,47

Fonte: Autoria própria.

A Figura 40 mostra a evolução das temperaturas dos fluidos no decorrer das repetições. É possível observar uma proporcionalidade na elevação da temperatura a partir da primeira repetição, a qual foi mantida, ou seja os três fluidos apresentaram elevação linear das temperaturas de forma parecida entre os fluidos. É possível notar que a elevação das temperaturas apresentou-se de maneira inversa ao ocorrido com a temperaturas dos corpos de provas. Isso confirma o comportamento dos fluidos na capacidade de troca de calor Na avaliação das temperaturas dos fluidos é possível observar que o óleo de Tungue, foi o que apresentou menor temperatura entre os fluidos; demonstrando assim um melhor potencial de lubrificação na região do atrito. Entre os fluidos, a água obteve o melhor desempenho, na transferência do calor do corpo de prova para o fluido apresentando, portanto o maior potencial de lubrificação.

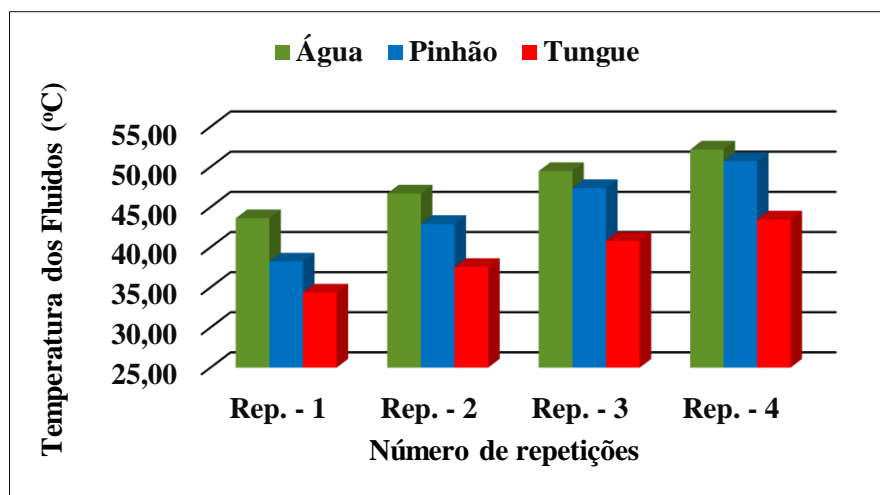


Figura 40 - Médias das temperaturas dos fluidos para os três fluidos - ensaio *Reichert Test*.

Fonte: Autoria própria.

4.2 Ensaio com Óleos de Base Vegetal Emulsificados

A seguir os resultados da aquisição das perdas de massa, áreas das elipses, temperaturas do corpo de provas e temperaturas dos fluidos para a emulsão de Pinhão manso, e Tungue.

As Tabelas A8 a A11 que apresentam, respectivamente, os valores das perdas de massa, áreas das elipses, temperaturas do corpo de provas e temperaturas dos fluidos para

as repetições dos pinos A - 1 e A - 2 ensaiados com emulsão de Pinhão manso e Tungue, encontram-se no Apêndice A.

As Figuras A7 a A10 que apresentam, respectivamente, as imagens das faces desgastadas do corpo de prova para os ensaios realizados com emulsão Pinhão manso e Tungue, para os pinos A 1 e A 2, encontram-se no Apêndice A.

A Tabela 12 mostra os valores médios das áreas da elipse para os pinos A - 1 e A - 2, ensaiados com emulsões de Pinhão manso e de Tungue.

Tabela 12 - Média das áreas da elipse (mm²) dos pinos.

Média das Rep.	Pinhão manso	Tungue
Rep. - 1	18,46	17,13
Rep. - 2	17,37	18,27
Rep. - 3	18,32	19,65
Rep. - 4	21,07	20,37

Fonte: Autoria própria.

Na Figura 41 é possível observar um comportamento semelhante entre as emulsões de Tungue e Pinhão manso; quanto aos valores das áreas desgastadas, observa-se um certo equilíbrio nos resultados, sendo que o gráfico mostra uma tendência crescente para os fluidos na fase final das repetições.

Para o óleo de Tungue, o gráfico apresenta uma tendência crescente de modo linear com poucas divergências entre os valores. Já para o óleo de Pinhão manso a partir da primeira repetição, o gráfico apresenta uma tendência de queda, voltando a crescer a partir da segunda repetição. Analisando os gráficos, pode-se concluir que os resultados das áreas das elipses para os óleos vegetais emulsificados, apresentaram um potencial de lubrificação e refrigeração.

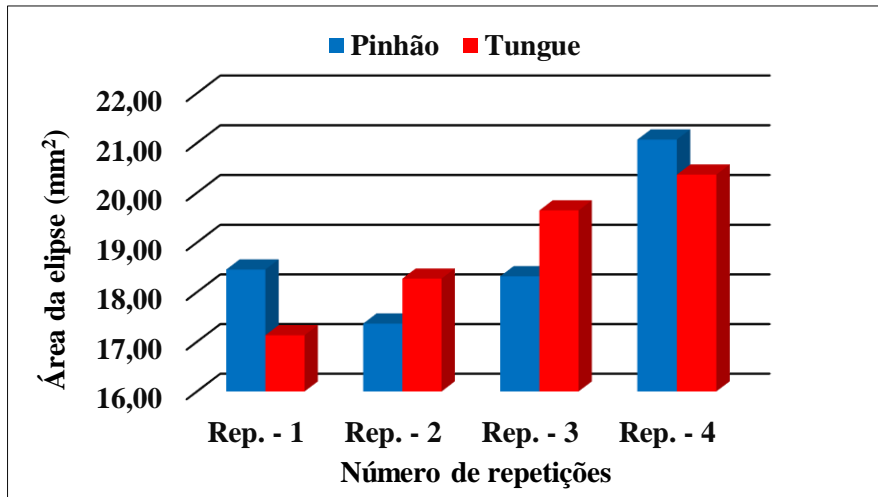


Figura 41 - Médias das áreas das elipses dos corpos de provas para as emulsões de Tungue e de Pinhão manso - ensaio *Reichert Test*.
Fonte: Autoria própria.

Nas Figuras 42 (a) e (b) é possível comparar os resultados obtidos para os fluidos de Pinhão manso e Tungue em duas condições, in natura e emulsificado. Pode-se observar que os resultados são parecidos tanto para emulsão como no estado natural, onde foi possível avaliar o desgaste por meio dos cálculos das dimensões das área da cratera. No caso do óleos emulsificado, observa-se equilíbrio entre os fluidos em todas as repetições com comportamento bastante regular e semelhantes entre eles. De modo geral, a condição de lubri-refrigeração que proporcionou melhores comportamentos com menores áreas desgastadas foram os fluidos emulsificado. Quando observa-se a performance dos fluido in natura, o óleo de Tungue apresentou uma regularidade as repetições. Já o Pinhão manso apresentou certa instabilidade de desempenho.

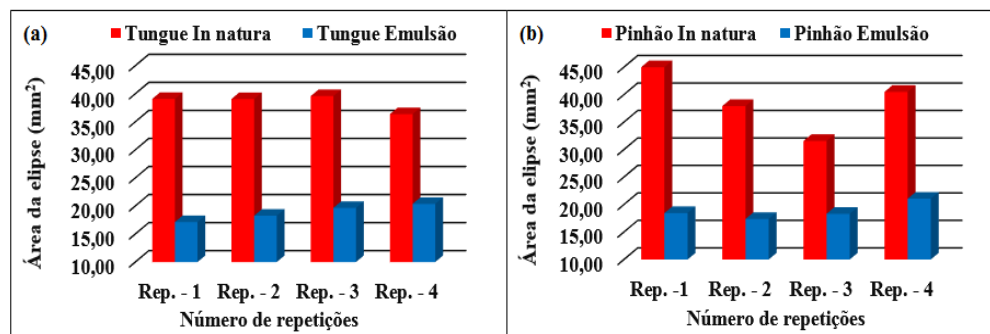


Figura 42 - Comparação das áreas das elipses dos CPs: (a) Tungue in natura e emulsão de Tungue; (b) Pinhão manso in natura e emulsão de Pinhão manso.
Fonte: Autoria própria.

A Tabela 13 mostra os valores médios das perdas de massa para os pinos A - 1 e A - 2, para as emulsões de Pinhão manso e de Tungue.

Tabela 13 - Médias das perdas de massa (g) dos pinos.

Média das Rep.	Pinhão manso	Tungue
Rep. - 1	0,04	0,05
Rep. - 2	0,03	0,03
Rep. - 3	0,04	0,03
Rep. - 4	0,04	0,03

Fonte: Autoria própria.

Na Figura 43 é possível observar as alternâncias entre os valores a cada repetição efetuada com as emulsões de Tungue e de Pinhão manso nas perdas de massa; apesar das variações, observa-se um certo equilíbrio nos resultados entre os fluidos, sendo que o gráfico apresenta leve tendência a redução das perdas de massa a partir da terceira repetição, para o óleo de Tungue. Já para o Pinhão manso, a partir da primeira repetição, ocorre uma inconstância nos valores de desgaste. Ao final dos testes ambos os fluidos apresentaram desempenho semelhante nos valores das perdas de massa.

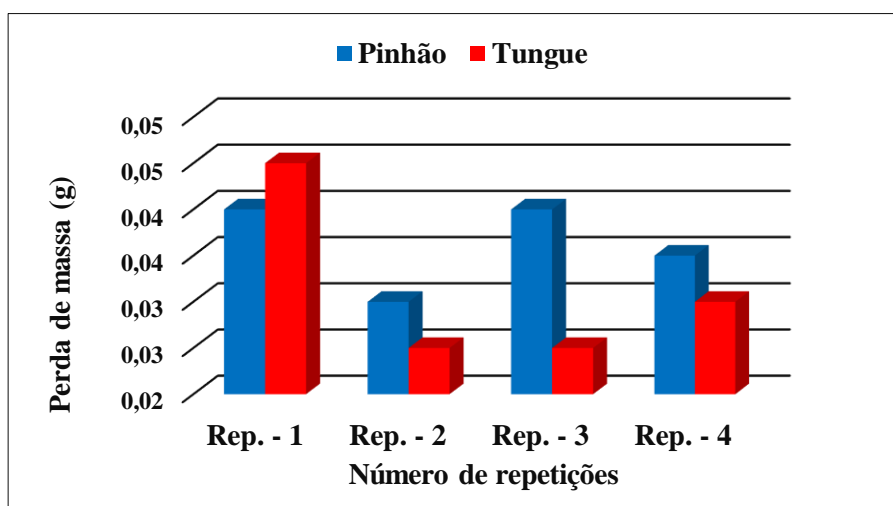


Figura 43 - Médias das perdas de massa dos corpos de prova para as emulsões de Tungue e de Pinhão manso - ensaio Reichert Test.

Fonte: Autoria própria.

Nas Figuras 44 (a) e (b) apresentam uma comparação dos resultados das perdas de massa obtidos entre os fluidos in natura e os emulsificados; considerando a

performance dos fluidos emulsificado, onde observa-se por meio dos gráficos certa estabilidade no decorrer das repetições, com resultados comparativamente, ou seja com menor áreas de cratera; do que os fluidos os in natura. Este por sua vez, apresentaram valores mais elevados de perda de massa do que os fluidos emulsificados. Possivelmente esse resultado tenha ocorrido devido a emulsão ter a seu favor a elevada capacidade de refrigeração na zona atritada, aliada aos fatores de lubrificação e de retirada de fragmentos da região atritada e também pela baixa viscosidade da emulsão que facilita a capacidade de molhar a superfície para estabelecer um lubrificação.

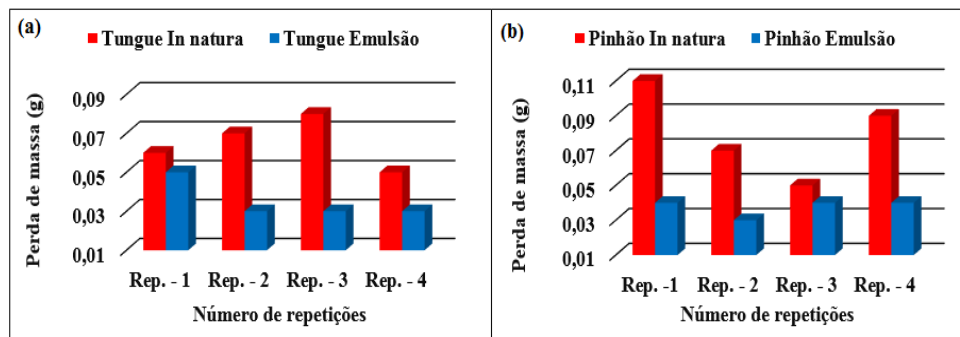


Figura 44 - Comparação das Perdas de massa: (a) Tungue in natura e emulsão de Tungue; (b) Pinhão manso in natura e emulsão de Pinhão manso.

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 14 mostra os valores referentes às temperaturas dos corpos de provas para os pinos A - 1 e A - 2, para as emulsões de Tungue e de Pinhão manso.

Tabela 14 - Médias das temperaturas (°C) dos CPs para os pinos.

Média das Rep.	Pinhão manso	Tungue
Rep. - 1	26,36	24,22
Rep. - 2	26,67	24,76
Rep. - 3	26,93	25,17
Rep. - 4	27,20	25,50

Fonte: Autoria própria.

Na Figura 45 é possível observar as temperaturas médias dos corpos de provas nas repetições efetuadas com emulsões de Tungue e de Pinhão manso. Observa-se um certo equilíbrio nos valores obtidos no decorrer das repetições. O gráfico apresenta uma

tendência de crescimento linear para as temperaturas para os dois fluidos porém, com valores ligeiramente superiores para a emulsão de Pinhão manso. Baseando-se nestes resultados, é possível afirmar que a emulsão de Tungue apresentou melhor desempenho quanto à capacidade de refrigeração do corpo de provas quando comparado com a emulsão de Pinhão manso.

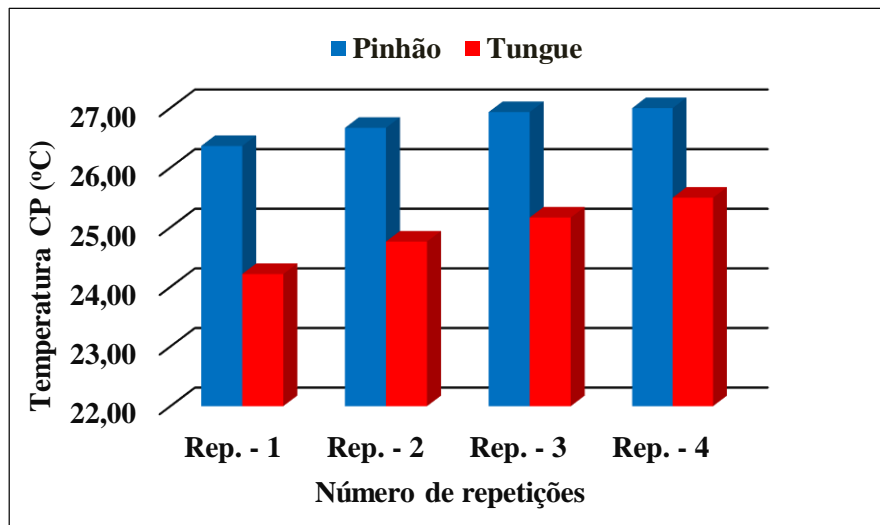


Figura 45 – Médias das temperaturas dos corpos de provas para as emulsões de Tungue e de Pinhão manso - ensaio *Reichert Test*.

Fonte: Autoria própria.

Por meio das Figuras 46 (a) e (b) é possível comparar o comportamento das temperaturas dos corpos de provas (CPs) ensaiados com fluidos emulsificados e in natura. A variação de temperatura no corpo de provas é um parâmetro utilizado como medida indireta do atrito gerado na interface pino/anel. Observa-se que os corpos de provas lubrificados com a emulsão de óleo de Tungue e de Pinhão manso emulsificado, apresentaram menores valores de temperaturas quando comparado com os respectivos fluidos in natura. Observa-se que os fluidos emulsificados apresentaram um comportamento muito parecido entre si, com pequenas variações do início ao final das repetições Além de temperaturas muito baixa, os fluidos apresentaram uma regularidade e equilibrados nas quatro repetições. Quando compara-se com o óleo in natura pode-se constatar que apesar de valores elevados de temperatura, tem-se uma semelhança com os fluidos emulsificados. É possível afirmar que a emulsão apresentou um excelente

desempenho, com melhores resultados de lubri-refrigeração quando comparada com os óleos in natura no quesito de troca de calor.

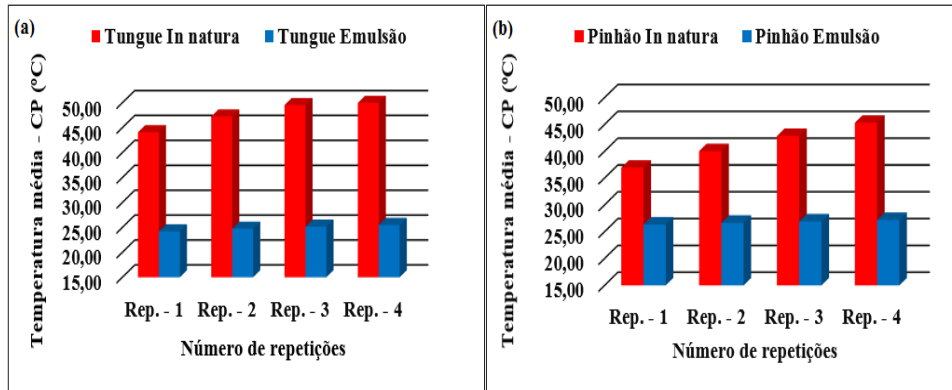


Figura 46 - Comparação das temperaturas dos CPs: (a) Tungue in natura e emulsão de Tungue; (b) Pinhão manso in natura e emulsão de Pinhão manso. Fonte: Autoria própria.

A Tabela 15 mostra os valores referentes às médias das temperaturas dos fluidos para os pinos A - 1 e A - 2, para as emulsões de Pinhão manso e de Tungue.

Tabela 15 - Médias das temperaturas (°C) dos fluidos para os pinos.

Média das Rep.	Pinhão manso	Tungue
Rep. - 1	35,08	31,83
Rep. - 2	30,46	32,66
Rep. - 3	30,77	33,27
Rep. - 4	31,08	33,84

Fonte: Autoria própria.

Na Figura 47 é possível observar as temperaturas dos fluidos nas repetições efetuadas com as emulsões de Tungue e de Pinhão manso. Observa-se um instabilidade na primeira repetição com resultados elevados para emulsão de Pinhão, seguida de queda rápida com estabilidade nas etapas seguintes. Já para a emulsão de Tungue, apesar de atingir valores superiores aos do Pinhão manso, é possível verificar equilíbrio no decorrer das repetições; o gráfico apresenta de forma linear o que parece ser uma tendência de equilíbrio na variação da temperatura.

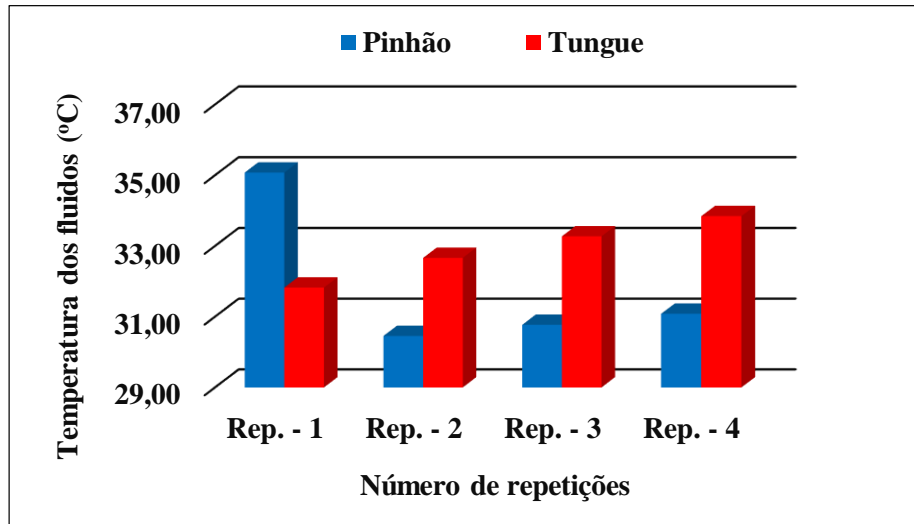


Figura 47 - Médias das temperaturas dos fluidos para as emulsões de Tungue e de Pinhão manso - ensaio *Reichert Test*.

Fonte: Autoria própria.

Nas Figuras 48 (a) e (b) é possível comparar o comportamento de temperatura dos fluidos emulsificados e in natura.

Observa-se que as temperaturas dos fluidos emulsificados apresentaram menores valores quando comparados com os fluidos in natura. É possível observar que os fluidos emulsificados apresentaram comportamento muito parecido entre si, com pequenas variações durante as repetições, com comportamento previsível. Isto mostra a baixa performance da emulsão de base vegetal; o que podem ser comprovado quando avalia-se as temperaturas dos corpos de provas no tópico anterior. Além de temperaturas baixas, os fluidos apresentaram uma regularidade de desempenho durante as repetições. É possível afirmar que as emulsões apresentaram excelentes resultados de lubri-refrigeração quando se trata de troca de calor.

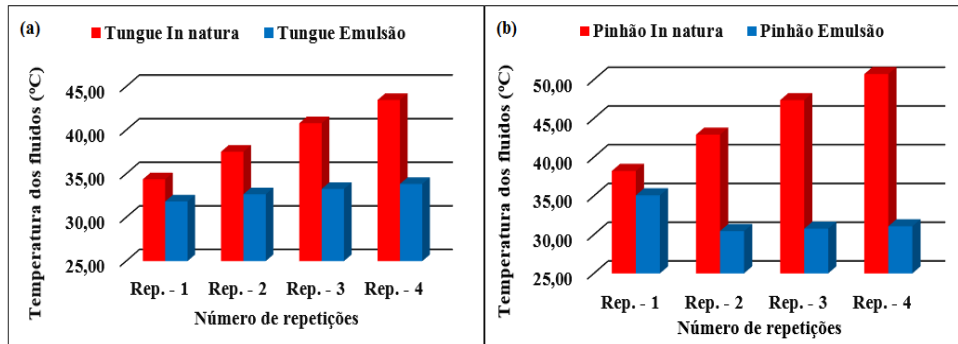


Figura 48 - Comparação das temperaturas dos fluidos: (a) Tungue in natura e emulsão; (b) Pinhão manso in natura e emulsão.

Fonte: Autoria própria.

4.3 Mecanismos de Desgaste Tribológico - Fluidos In natura

A partir das Figuras 49 (a) e (b) até as Figuras 54 (a) e (b) são apresentados os resultados e observações dos detalhes das superfícies desgastadas, dos pinos e anéis, para todas as condições de contato estudadas, utilizando como fluidos: Água, óleo de Tungue e Pinhão manso in natura. Esta análise foi realizada por meio de imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV).

As Figuras 49 (a) e (b) apresentam as imagens da pista de desgaste para o pino de aço no experimento realizado com Água. No detalhe 1 da Figura 49 (a) pode-se ver que a superfície apresenta-se lisa, indicando que nesta região o desgaste apresentou-se de forma moderada. Porém, o detalhe 2 da mesma figura apresenta evidências de superfície áspera, apresentando deformação plástica com superfícies na forma de escamas originadas pelo atrito.

Nos detalhes 1 e 2 da Figura 49 (b) observa-se uma superfície com rebarbas, o que pode ser entendido como uma superfície com elevadas deformações plásticas, indicando um baixo desempenho do fluido como lubrificante. Ainda na Figura 49 (b) é possível ver marcas de desgaste abrasivo na superfície desgastada, as marcas em formas de pequenos sulcos são provenientes das ações de partículas presentes no lubrificante, produzidas durante o processo de fricção. Na mesma figura, o sentido de deslizamento está indicado pela seta vermelha.

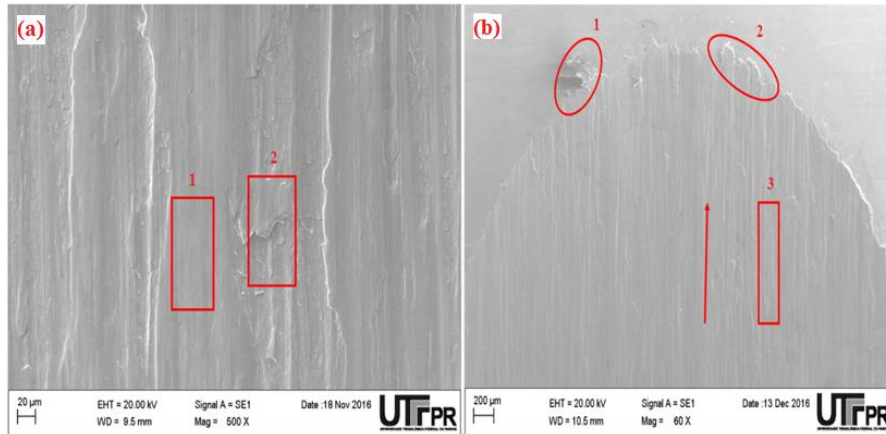


Figura 49 - Imagens da região de desgaste nos ensaios com Água: (a) superfície do pino A - 1; (b) superfície do pino A - 2 com direção de deslizamento.
Fonte: Autoria própria.

As Figuras 50 (a) e (b) apresentam as imagens da superfície do anel no experimento realizado com Água (o qual representa a ferramenta de corte, ou seja, o material de maior resistência mecânica comparativamente ao pino).

Nos detalhes 1 e 2 da Figura 50 (a) pode-se observar camadas de materiais do pino que evidenciam aderência à superfície do anel. A seta vermelha indica a direção de deslizamento. No detalhe 1 da Figura 50 (b) pode-se observar uma superfície lisa, evidenciando que esta região não apresentou aderência de material na superfície do anel. Já no detalhe 2 pode-se observar uma camada de material proveniente do pino que recobriu a superfície do anel. Ao analisar as imagens, pode-se afirmar que houve adesão de material do pino sobre a superfície do anel.

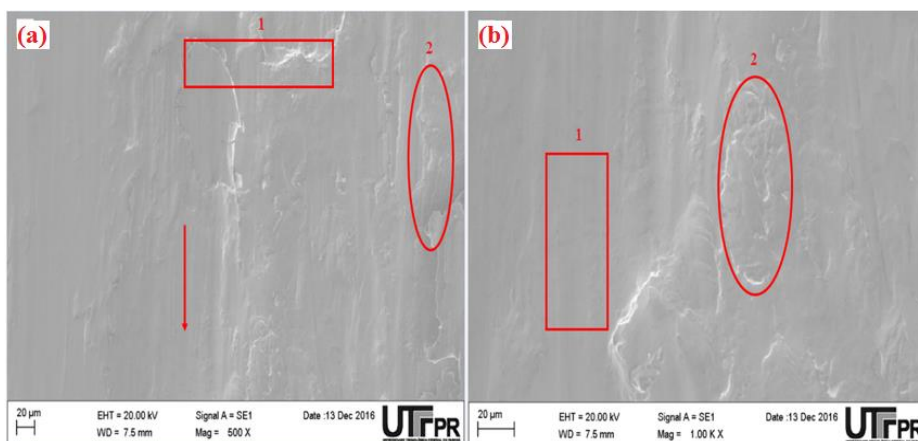


Figura 50 - Imagens da superfície do anel, região de adesão de material do pino nos ensaios com Água: (a) detalhes de adesão e sentido de deslizamento; (b) detalhes da superfície com aderência.
Fonte: Autoria própria.

As Figuras 51 (a) e (b) mostram a superfície desgastada do pino após a realização dos ensaios com óleo de Tungue in natura.

Como pode ser observado na Figura 51 (a) os pinos apresentaram uma grande quantidade de material removido que ficaram livres para rolar entre as superfícies. Na Figura 51 é possível observar a presença de placas de material com forte deformação plástica nas áreas atritadas.

O detalhe 1 da Figura 51 (a) indica a ocorrência de um atrito mais elevado, por apresentar placas de transferência de material, que apresenta-se na formação de zonas salientes, que não são mais do que aglomerados de partículas com fortes deformações plásticas, acompanhadas por camadas de óxidos.

No detalhe 2 da mesma Figura 51 (a), tem-se na direção de deslizamento, uma fase inicial de aumento de atrito, seguido de um decréscimo, passando para um regime de estabilização, onde vê-se a presença de uma superfície lisa que possivelmente tenha sido originada de fragmentos em formas de lamelas com fortes deformações plásticas.

Na Figura 51 (b) o comportamento que se verifica induz um maior atrito por apresentar partículas de material incorporadas à superfície do pino. O processo é bastante instável onde os fragmentos aderiram à superfície devido às tensões de contato e às tensões resultantes do processo. O que pode-se afirmar é que nestes pontos o atrito foi severo, resultando em deformação plástica das partículas, arrancadas do corpo de provas, conforme mostra o detalhe 1 da Figura 51 (b). Tem-se um processo de oxidação de material após arrancamento de fragmentos da superfície do corpo de provas.

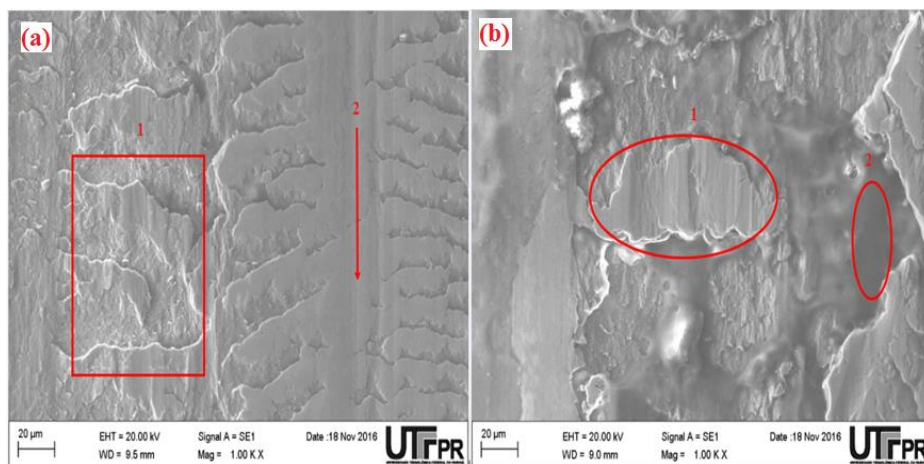


Figura 51 - Imagens da região de desgaste nos ensaios com óleo de Tungue in natura: (a) superfície do pino A - 1 com direção de deslizamento; (b) superfície do pino A - 2 com detalhes de desgaste.

Fonte: Autoria própria.

As Figuras 52 (a) e (b) mostram as superfícies do anel, obtidas após os ensaios com óleo de Tungue in natura. As imagens da superfície do anel foram obtidas através de microscopia eletrônica de varredura (MEV) para todas as condições de superfície estudadas.

No detalhe 1 da Figura 52 (a) é possível visualizar um decréscimo do atrito, passando para um regime de estabilização, onde constatamos a presença de uma superfície lisa, com pequenas marcas de deformação, possivelmente ocasionados por partículas do corpo de provas.

No detalhe 2 da Figura 52 (a) tem-se evidência ainda de uma quantidade reduzida de material do corpo de provas, aderida à superfície do anel. Na Figura 52 (b) nos detalhes 1 e 2 podem ser observados camadas de materiais do pino que evidenciam aderência à superfície do anel e também é possível visualizar microssulcamentos que possivelmente tenham sido originados de fragmentos do corpo de provas.

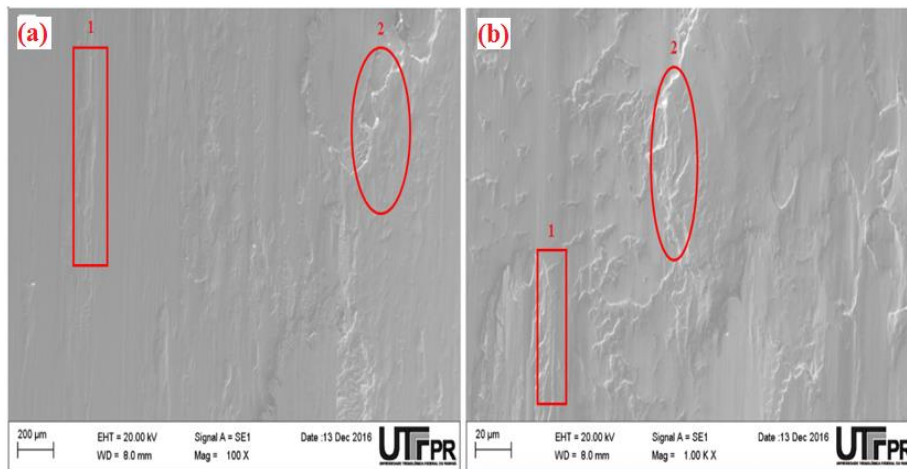


Figura 52 - Imagens da superfície do anel, região de adesão de material do pino nos ensaios com óleo de Tungue in natura: (a) seleção de detalhes de adesão; (b) detalhes da superfície com aderência de material do pino.
Fonte: Autoria própria.

As Figuras 53 (a) e (b) apresentam as imagens da superfície do pino após a realização dos ensaios com óleo de Pinhão manso in natura. As imagens das superfícies de desgaste foram obtidas através de microscopia eletrônica de varredura (MEV) para todas as condições de superfície estudadas.

Na Figura 53 (a) nos detalhes 1 e 2 é possível visualizar uma redução no volume de material deformado na superfície do pino. No detalhe 2 da mesma figura, apresenta as

imagens que evidenciam a redução de regiões de deformação superficial, com a ocorrência de desgaste de forma moderada, com redução de atrito na superfície de contato pino/anel. Na Figura 53 (b) no detalhe 1, tem-se a direção de deslizamento, onde verifica-se regiões com alternância de acabamento superficial, passando para um regime de estabilização com a presença de superfície lisa e sinais de sulcamento.

Na Figura 53 (b), no detalhe 2, o comportamento que se verifica indica a ocorrência de um atrito severo por apresentar de forma intensa, partículas de material, possivelmente originadas de fragmentos provenientes do desgaste, em formas de lamelas, que incorporam na superfície de atrito. É possível avaliar por meio das imagens que o processo de desgaste foi bastante instável onde os fragmentos presentes no óleo aderiram à superfície atritada devido às tensões de contato e às tensões resultantes do processo.

No detalhe 2, observa-se também danos por deformação plástica, que podem ser resultado do desgaste adesivo. Esse dano pode ser caracterizado pela falha do filme lubrificante. Nesta região, o atrito ocorreu de forma mais intensa, resultando uma deformação plástica das partículas arrancadas e incorporadas à superfície de atrito.

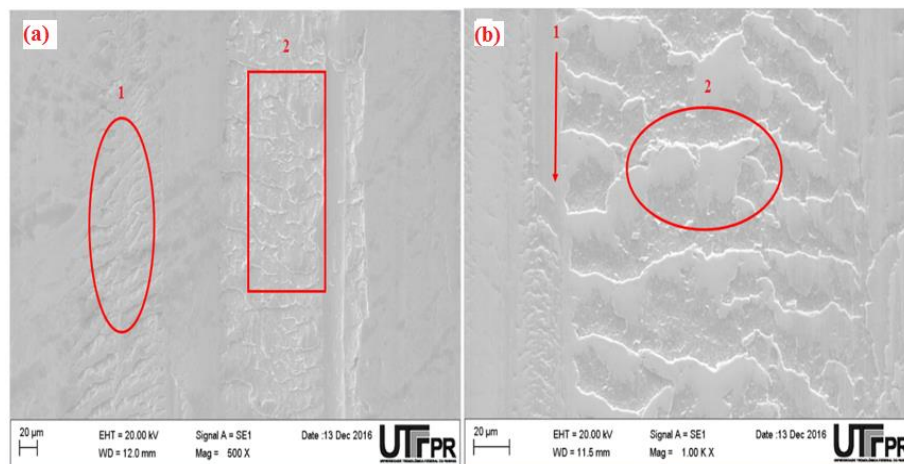


Figura 53 - Imagens da região de desgaste nos ensaios com Pinhão manso in natura: (a) superfície do pino A - 1; (b) superfície do pino A - 2 com direção de deslizamento.

Fonte: Autoria própria.

Figura 54 (a) e (b) apresentam a análise das superfícies do anel atritado (que aqui representa a ferramenta de corte) com óleo de Pinhão manso in natura.

Figura 54 (a) nos detalhes 1 e 2 é possível observar, a quantidade de material do corpo de prova aderido à superfície do anel, ocorreu de forma moderada com alternância

de substrato aderido à superfície do anel. Na figura 54 (b) 1, pode ser observado que o mecanismo mais perceptível, foi adesão do material do corpo de provas na superfície do anel, com alternância de superfície lisa, o mecanismo de adesão apresenta de forma moderada.

Na Figura 54 (b) no detalhe 1, apresenta superfície com adesão de moderada para forte, com evidências de fortes atritos causando deformações plásticas de materiais provenientes do corpo de prova. O segundo comportamento que se verifica na Figura, induz a um processo com alternância de superfície com aderência e superfície lisa na superfície do anel.

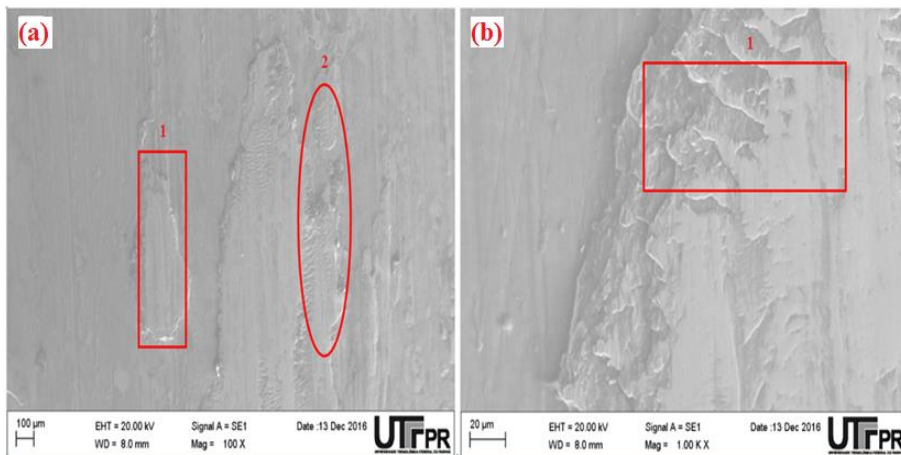


Figura 54 - Imagens da superfície do anel, região de adesão de material do pino nos ensaios com óleo de Pinhão manso in natura: (a) seleção de detalhes de adesão;(b) detalhes da superfície com aderência de material do pino. Fonte: Autoria própria.

4.3.1 Mecanismos de Desgaste Tribológico - Fluidos Emulsificados

A partir das Figuras 55 (a) e (b) até as Figuras 58 (a) e (b) são apresentados os resultados das observações das superfícies desgastadas, tanto do pino quanto do anel, para todas as condições de contato estudadas, utilizando como fluido óleo de Tungue e Pinhão manso emulsificado. Esta análise foi realizada por meio de imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV).

No detalhe 1 da Figura 55 (a) tem-se a imagem do pino ensaiado com óleo de Tungue emulsificado, nota-se uma grande redução de deformação superficial; a região

desgastada apresenta-se de forma reduzida; é possível afirmar que o atrito ocorreu de forma moderada, indicando o bom desempenho do fluido, a superfície apresenta-se de forma mais homogênea; já não são tão visíveis, a ocorrência de deformação superficial, pode-se dizer que o processo de desgaste ocorreu de forma moderada. Pode-se afirmar que a ação do emulsão de Tungue apresentou comportamento satisfatório.

No detalhe 2 da Figura 55 (a) apresenta uma superfície com reduzida deformação, com evidencia de superfície recoberta com uma película supostamente de origem do próprio fluido, formando uma superfície oxidada, seguido de um decréscimo de desgaste, passando para um regime de estabilização onde temos a presença de uma superfície lisa.

Nos detalhes 1 e 2 da Figura 55 (b), percebe-se uma alternância entre superfície lisa e superfície rugosa. O detalhe 2 evidencia desgaste triboquímico ou desgaste corrosivo causado por atrito entre duas superfícies sólidas que reagem com um ambiente corrosivo, ainda que em volume reduzido; percebe-se também a ocorrência de adesão de partículas provenientes do desgaste que se incorporaram à superfície. Ao analisar as imagens, pode-se dizer que as ações de lubrificação e refrigeração da emulsão de Tungue apresentaram comportamento satisfatório.

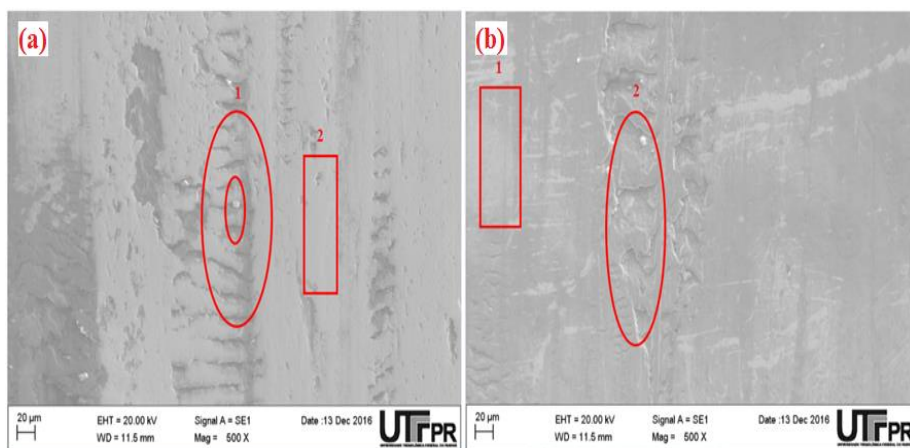


Figura 55 - Imagens da região de desgaste nos ensaios com óleo de Tungue emulsificado: (a) superfície do pino A - 1; (b) superfície do pino A - 2 com detalhes do desgaste.

Fonte: Autoria própria.

As Figuras 56 (a) e (b) apresentam a análise das superfícies do anel atritado (o qual representa a ferramenta de corte, ou seja, o material de maior resistência mecânica comparativamente ao pino) com óleo de Tungue emulsificado.

Nas Figuras 56 (a) e (b) é possível visualizar redução no volume de material aderido à superfície do anel.

No detalhe 1 da Figura 56 (a), vê-se pequenas áreas de deformação que possivelmente tenham sido ocasionadas por fragmentos arrancados do corpo de provas e incorporados à superfície do anel.

No detalhe 2 tem-se evidências, embora em volume reduzido, de material do corpo de provas aderido à superfície do anel, alternado com ocorrências de pontos de esfoliação, tornando a superfície áspera. Já nos detalhes 1 e 2 da Figura 56 (b) pode ser visto um decréscimo acentuado de material aderido, passando para um regime de estabilização, onde vê-se uma superfície lisa, evidenciando desempenho satisfatório da emulsão de Tungue.

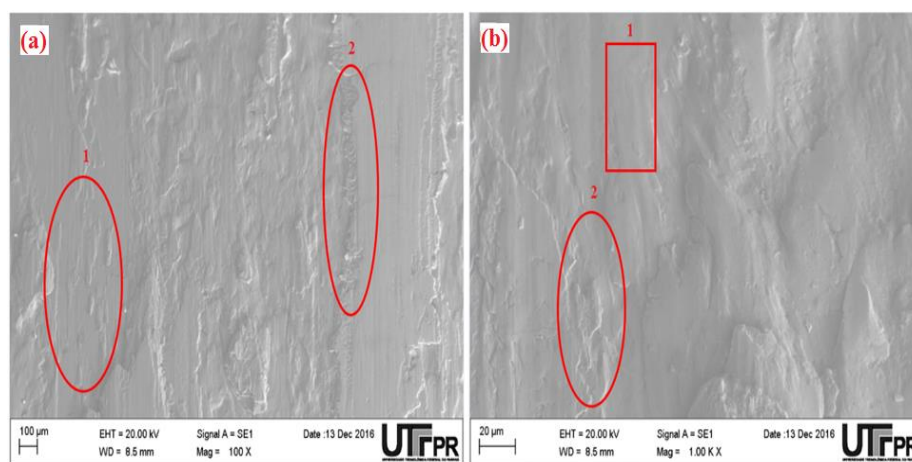


Figura 56 - Imagens da superfície do anel, região de adesão de material do pino nos ensaios com óleo de Tungue emulsificado: (a) seleção de detalhes de adesão; (b) detalhes da superfície com aderência de material do pino. Fonte: Autoria própria.

As Figuras 57 (a) e (b) apresentam a análise das superfícies do pino atritado com emulsão de Pinhão manso, as imagens para todas as condições de superfície estudadas.

Na Figura 57 (a) nos detalhes 1 e 2 tem-se as imagens da superfície desgastada, com a presença de regiões limpas, com poucas saliências, evidenciando a redução acentuada de atrito, isto pode ser comprovado através da imagem no detalhe 1 da mesma

figura, a superfície mostra-se de forma lisa, com poucas regiões de deformação ou fragmentos na face desgastada. Segundo Gonçalves (2013), as propriedades de detergência das amostras pode ser avaliada por meio de limpeza, rebarbas sobre o pino, aspecto físico do produto e área de desgaste.

No detalhe 2 da Figura 57 (a) é possível verificar uma redução bastante significativa no volume de material na superfície, essa redução pode estar associada ao comportamento de refrigeração e lubrificação, evidenciando bom desempenho do fluido.

Na Figura 57 (b) nos detalhes 1 e 2 é possível observar uma superfície bastante limpa, com acabamento liso, sem indícios de regiões ásperas ou deformações originadas pelo atrito. Na mesma Figura é possível identificar regiões com camadas mais claras, evidenciando pontos de óxidos, possivelmente originados de resíduos de fluido. Ainda na mesma Figura no detalhe 2, é possível visualizar pontos que evidenciam leve deformação e desgaste da superfície ocorrido pelo mecanismo de desgaste abrasivo por microsulcamento e formação de arestas causados por partículas provenientes da ação de desgaste. Analisando as imagens, é possível afirmar que a emulsão de Pinhão manso apresentou desempenho satisfatório no quesito lubrificação e refrigeração na região de atrito, resultados semelhantes já obtidos por Gonçalves (2013).

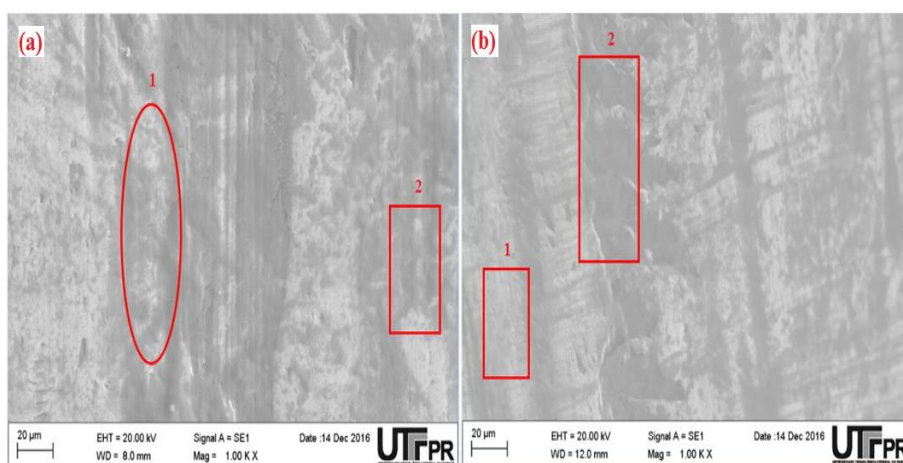


Figura 57 - Imagens da região de desgaste nos ensaios com emulsão de Pinhão manso: (a) superfície do pino A - 1; (b) superfície do pino A - 2 com detalhes do desgaste.

Fonte: Autoria própria.

As Figuras 58 (a) e (b) apresentam análise das superfícies do anel que foi realizada através de microscopia eletrônica de varredura (MEV) para todas as condições de superfície estudadas, com emulsão de Pinhão manso.

Os detalhes 1 e 2 da Figura 58 (a) apresentam a superfície do anel atritado, quando é possível visualizar regiões bastante limpas com reduzido volume de material aderido à superfície do anel, que podem estar associados ao desempenho do fluido.

No detalhe 2, da mesma Figura, pode ser vista uma redução na quantidade de material aderido na superfície do anel, evidenciando bom desempenho do fluido no quesito refrigeração e lubrificação com redução significativa do atrito.

Nos detalhes 1 e 2 da Figura 58 (b) é possível observar uma superfície bastante limpa, com acabamento liso, com poucas regiões ásperas, demonstrando que o processo adesivo ocorreu de forma moderada. A ocorrência de materiais aderidos mostra-se reduzida na superfície do anel, evidenciando que na interface pino/anel, o atrito foi reduzido pela ação de refrigeração e lubrificação.

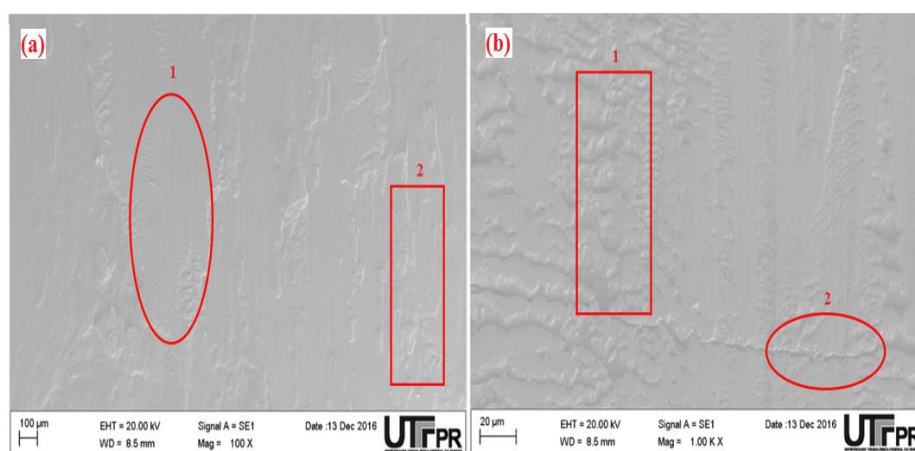


Figura 58 - Imagens da superfície do anel, região de adesão de material do pino nos ensaios com óleo de Pinhão manso emulsificado: (a) seleção de detalhes de adesão; (b) detalhes da superfície com aderência de material do pino. Fonte: Autoria própria.

4.3.2 Discussão dos Ensaios Tribológicos

Nesta fase dos ensaios, foi possível constatar o bom desempenho de lubrificação para os óleos de Tungue, quando comparado com óleo de Pinhão manso e Água. Esta foi

a fase inicial dos ensaios tribológicos para avaliar as características de lubrificação e refrigeração em baixas temperaturas. Os melhores desempenhos foram obtidos com os óleos de base vegetal de Pinhão manso e Tungue, os desgastes foram significativamente menores quando comparado com a Água.

A taxa de desgaste foi o principal critério de comparação entre os diferentes fluidos, com base nos experimentos tribológicos. Nos ensaios *Reichert Teste*, foi possível avaliar a área de desgaste e concluir que os óleos vegetais de Pinhão manso e Tungue foram os fluidos que apresentaram melhores desempenhos de lubrificação quando comparado com Água nos testes tribológicos; uma hipótese, baseada no trabalho citada por Gonçalves et al.(2014), esse resultado positivo possivelmente se deve pela quantidade de ácidos graxos insaturados presentes nos fluidos de base vegetal, o que não ocorre com a água. Segundo Kuroda (2006), o alinhamento das moléculas dos óleos vegetais contribui diretamente no quesito lubrificação dos fluidos.

Na avaliação da área da elipse, para os fluidos in natura, a Água obteve média final de 42,61 mm², o óleo de Tungue obteve área média de 38,53 mm². Já o óleo de Pinhão manso apresentou área de desgaste médio de 38,87 mm², portanto um resultado 0,34 mm² menor para o Tungue em comparação com o óleo de Pinhão manso.

Quando avaliou-se as massas perdidas para os fluidos in natura, tem-se para Água 10 g de massa perdida, para o óleo de Tungue, média de 0,06 g de massa perdida, já para o Pinhão manso, média de 0,08 g de massa perdida, portanto um resultado 0,02 g menor para o Tungue em comparação com o óleo de Pinhão manso.

Na avaliação da temperatura do corpo de provas, para os fluidos in natura, a Água obteve média final de 34,42 °C, o óleo de Tungue obteve média de 48,02 °C; já para o Pinhão manso, média de 41,27 °C, portanto um resultado 6,74 °C maior para o Pinhão manso em comparação com o óleo de Tungue.

Na avaliação da temperatura dos fluidos para os fluidos in natura, a Água obteve média final de 47,99 °C, o de Tungue obteve média de 39,05 °C; já para o Pinhão manso, média de 44,81 °C, portanto um resultado 5,76 °C maior para o Pinhão manso em comparação com o óleo de Tungue.

Na avaliação da área da elipse para a emulsão de Tungue, e Pinhão manso, o Tungue obteve área média de 18,85 mm². Já o Pinhão manso apresentou área de desgaste média de 18,80 mm², portanto um resultado 0,05 mm² menor para a emulsão de Pinhão manso.

Na avaliação das massas perdidas, para as emulsões de Tungue e Pinhão, ambos os fluidos obtiveram média de 0,03 g de massa perdida, portanto, os fluidos emulsificados apresentaram comportamentos iguais.

Na avaliação da temperatura do corpo de provas, o Tungue obteve média de 24,91 °C, já o Pinhão manso obteve média de 26,79 °C, portanto um resultado maior de 1,88 °C para a emulsão de Pinhão manso em comparação com a emulsão de Tungue.

Na avaliação da temperatura dos fluidos, com fluidos emulsificados, o Tungue, obteve média de 32,90 °C, já para o Pinhão manso a média foi 31,85 °C; portanto um resultado maior de 1,05 °C para a emulsão de Tungue em comparação com a emulsão de Pinhão manso.

4.4 Resultados dos Ensaios de Usinagem - Base Vegetal Emulsificada

Nesta seção serão apresentados e discutidos os resultados de desempenho dos fluidos de base vegetal emulsificados obtidos durante a usinagem por fresamento do ferro fundido CGI. Alguns parâmetros de saída foram analisados, tais como desgaste da ferramenta, rugosidade da superfície e consumo de potência.

4.4.1 Desgaste de Ferramenta

A medição do desgaste de ferramenta neste trabalho, foi realizado até que a mesma atingisse o seu limite máximo de $VB_{Bmáx} = 0,2$ mm no flanco da ferramenta, determinando seu fim de vida.

Foram realizados ensaios de usinagem com três repetições de arestas para cada fluido, sendo que os parâmetros de corte, foram iguais para os fluidos.

Os desgastes das ferramentas foram aquisitados a cada intervalo de 0,72 m de material usinado. As medições de desgastes foram feitas através de um microscópio digital portátil da marca Dino-Lite Pro modelo AM-313T com ampliação de até 200 X com auxílio do software para medição Dino Capture 2.0.

A Figura 59 mostra a ferramenta utilizada nos testes experimentais para os fluidos de corte de base vegetal.

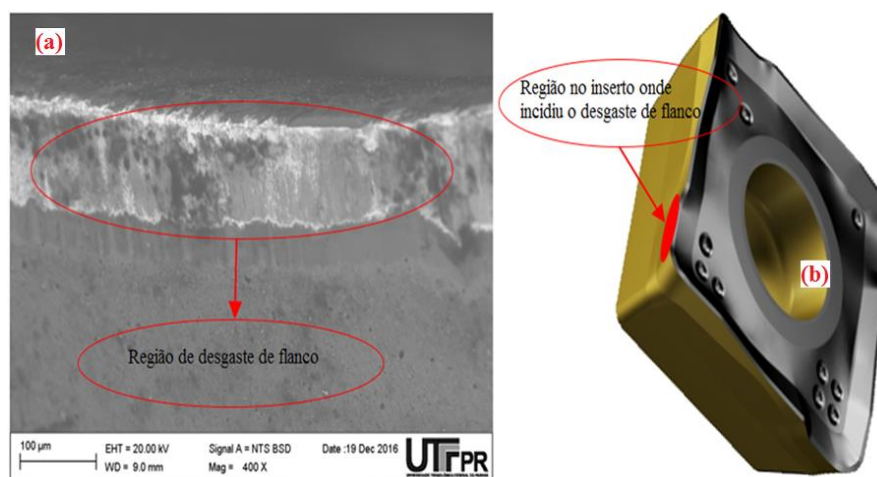


Figura 59 - a) Ferramenta com desgaste de flanco usada nos ensaios; b) ferramenta nova onde incidiu o desgaste.
Fonte: Autoria própria.

Nas Tabelas A.12 a A.17 do Apêndice A. podem ser encontrados os valores dimensionais de desgaste, comprimento usinado e as médias dos valores de desgaste de flanco para cada intervalo de medição para as arestas 1, 2 e 3.

Conforme mostrado na Figura 60 a média do desgaste de flanco foi comparada entre as emulsões de Tungue e Pinhão manso em função do comprimento usinado, utilizando os mesmos parâmetros. Nesta condição, notou-se que os dois fluidos ao atingirem o terceiro intervalo de medição de desgaste de aresta, com um comprimento máximo usinado de 2,16 m de comprimento para a aresta 1, alcançaram seu desgaste máximo de flanco. Por esse motivo, pode-se dizer que houve uma equivalência entre os dois fluidos. Após o terceiro intervalo de medição, anotou-se um desgaste para o Tungue de 0,223 mm e para a emulsão de Pinhão manso, de 0,288 mm.

O gráfico apresenta-se de maneira linear crescente demonstrando que a cada repetição o desgaste apresenta tendência a evolução. Os valores de dispersão existentes em relação à média foram obtidos através da média de três intervalos.

Quando interpola-se o gráfico para verificar o comprimento usinado com o desgaste pré-definido de 0,20 mm, nota-se uma equivalência entre os dois fluidos, mas com uma pequena vantagem para a emulsão de Tungue que usinou 1,74 m de material

contra 1,58 m para a emulsão de Pinhão manso, o que corresponde a um rendimento de 10% para a base vegetal de Tungue.

Já quando compara-se o comprimento final 2,16 m usinado com relação ao desgaste, pode ser verificado uma pequena diferença. Neste caso, pode-se dizer que os fluidos, tanto de Pinhão manso quanto o de Tungue tem desempenhos muito próximos.

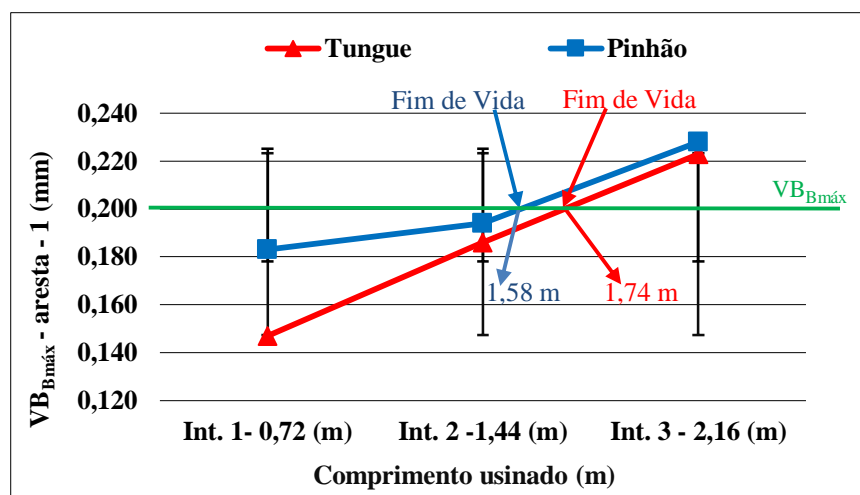


Figura 60 - Evolução do desgaste da ferramenta.
Fonte: Autoria própria.

A Figura 61 mostra o comprimento total usinado e o número de repetições para ambos os fluidos que são comparados entre si, sempre utilizando os mesmos parâmetros de corte. Ao final de cada intervalo, foram avaliadas as dimensões de desgaste, até que as mesmas atingissem o desgaste máximo de 0,2 mm, caso contrário os intervalos de medição continuariam até alcançar os objetivos propostos. Desta forma, tem-se um comprimento máximo de 2,16 m de material usinado para o fluido de Tungue, e 2,88 m para o fluido de Pinhão manso para a aresta 2, portanto um rendimento de 33% para o Pinhão manso.

No entanto, quando interpolados os gráficos, pode-se observar que o desgaste máximo de flanco de 0,2 mm para o Tungue, foi atingido ao usinar um comprimento de 1,52 m, enquanto que o Pinhão manso, para chegar aos mesmos valores de desgaste de flanco, usinou um comprimento de 2,58 m. Neste sentido, tem-se um desempenho muito superior para o Pinhão manso, com rendimento de 70% em comparação com o fluido de Tungue.

Já quando compara-se o comprimento total usinado com as dimensões de desgaste até atingir o último intervalo de medição, sendo 2,16 m para o Tungue com três intervalos, de medição, com desgaste médio de flanco 0,257 mm e 2,88 m de material usinado para o Pinhão manso com quatro intervalos, com desgaste médio de 0,207 mm, verifica-se um rendimento para o fluido de Pinhão manso 24% menor no desgaste médio de flanco.

Quando compara-se o desgaste ocorrido ao final da primeiro intervalo com 0,72 m de material usinado, pode-se notar uma diferença de desgaste bastante significativa, onde a emulsão de Tungue apresenta um desgaste de flanco de 0,194 mm, enquanto que o Pinhão manso apresentou 0,158 mm de desgaste de flanco, portanto já no primeiro intervalo um rendimento 23% maior para o Pinhão manso em relação ao Tungue.

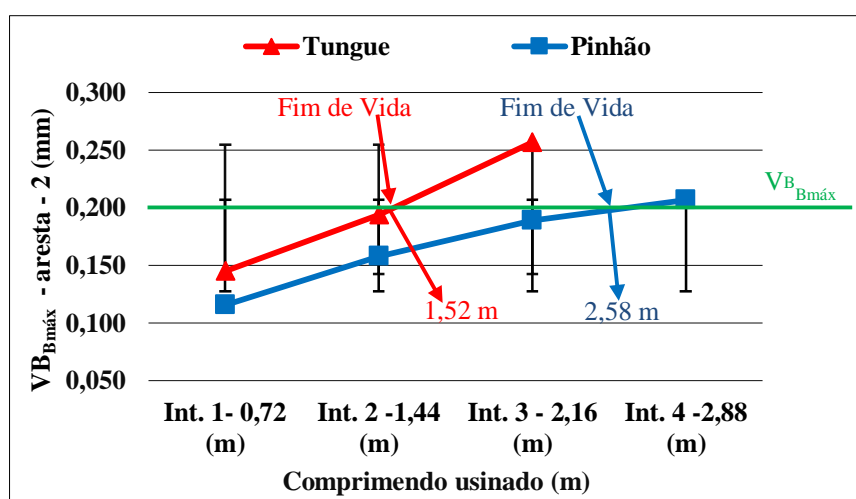


Figura 61 - Evolução do desgaste da ferramenta.
Fonte: Autoria própria.

A Figura 62 mostra o comprimento total usinado para as duas condições de fluidos e o número de intervalos para ambos os fluidos que são comparadas entre si, sempre utilizando os mesmos parâmetros de corte.

Desta forma, tem-se um comprimento máximo de 2,16 m de material usinado para o fluido de Tungue, e 2,88 m para o fluido de Pinhão manso para a aresta 3, portanto um rendimento 33% maior para o Pinhão manso.

No entanto, pode-se observar que o desgaste máximo de flanco de 0,2 mm para o Tungue foi atingido, ao usinar um comprimento de 1,49 m, enquanto que o Pinhão

manso; para chegar ao valor de desgaste de flanco, usinou um comprimento de 2,54 m. Assim, tem-se um desempenho muito superior para o Pinhão manso, com rendimento 70% maior comparado ao fluido de Tungue.

Quando compara-se o desgaste de flanco ocorrido ao final do primeiro intervalo de 0,72 m de material usinado, nota-se diferenças de desgaste bastante significativas, onde a emulsão de Tungue apresentou um desgaste de flanco de 0,194 mm, enquanto que o Pinhão manso com o mesmo comprimento usinado alcançou 0,100 mm, portanto já no primeiro intervalo, o Pinhão manso apresentou um rendimento 94% maior em relação ao Tungue.

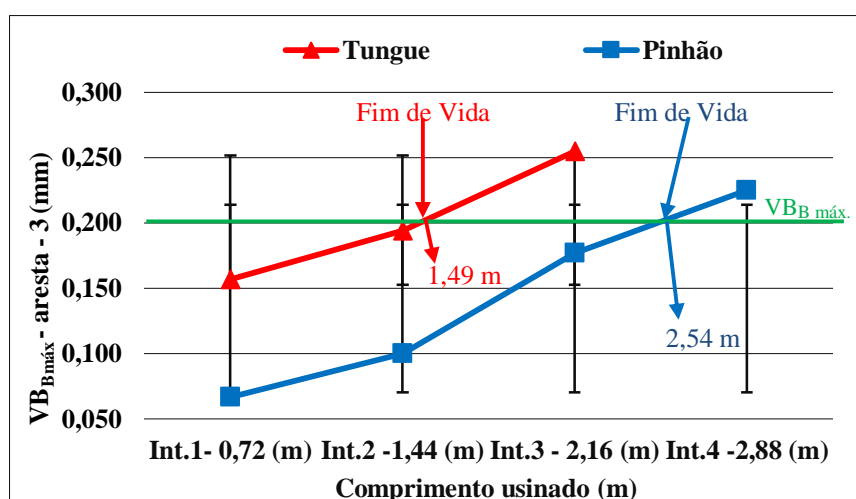


Figura 62 - Evolução do desgaste da ferramenta.
Fonte: Autoria própria.

4.4.2 Mecanismos de Desgaste

Após atingir o fim de vida da ferramenta, as arestas de corte utilizadas nos ensaios foram analisadas com o auxílio de Microscópio Eletrônico de Varredura MEV equipado com sistema EDX. Neste trabalho, serão apresentadas apenas as imagens que representam os fenômenos observados nas ferramentas.

Análises da composição EDX nos pontos destacados, são mostrados nas Tabelas A. 18 a 21 Apêndice A podem ser encontrados os valores referentes a

composição química em porcentagem (%) para a ferramenta de corte de metal duro revestido, com utilização do fluido de Pinhão manso e Tungue.

Após a análise destas Figuras, pode-se tentar definir quais foram os mecanismos de desgaste da ferramenta ao longo de sua vida. Durante os ensaios, a cada 0,72 m de comprimento efetivo de usinagem, o desgaste foi monitorado com o auxílio de um Microscópio Ótico.

A Figura 63 mostra a imagem obtida por MEV da superfície de saída da ferramenta após a usinagem de 2,88 m de comprimento utilizando fluido de base vegetal de Pinhão manso, no fresamento de ferro fundido CGI.

A Figura 63 (a) mostra na superfície de saída (ponto 2) um desgaste composto de microlascamentos (lascamentos menores do que o critério de fim de vida da ferramenta), além de adesões de material do corpo de prova.

Análises de composição EDX nos pontos destacados na Figura 63 (a) identificaram elevados teores de tungstênio no detalhe 3, demonstrando que o substrato está exposto e não tem o auxílio da cobertura para o corte no final da vida da ferramenta. Na mesma Figura, a análise EDX identificou elevados teores de ferro, carbono, silício nos pontos 1, 2, 4 e 6, elementos que compõem o material de corpo de prova, demonstrando a ocorrência de adesões do material usinado na aresta de corte.

Nas imagens da Figura 63 (b) é possível identificar nos pontos 2, 4, 5 e 6 elevados teores de ferro, silício e carbono, elementos que compõem o material de corpo de prova, evidenciando o mecanismo de adesão na aresta de corte. Analisando as imagens, os principais mecanismos de desgaste e/ou avarias na aresta de corte, foram os microlascamentos e as adesões. Nas duas imagens (a) e (b) não há forte presença de riscos abrasivos na superfície de saída, demonstrando que o desgaste abrasivo possivelmente tenha ocorrido de forma moderada, portanto não foi o principal mecanismo de desgaste.

Na imagem da Figura 63 (b) evidencia-se a presença de lascamento parcial e desgaste na superfície de saída da ferramenta, deslocamento do revestimento de Nitreto de Titânio (TiN). Em várias regiões nos pontos 2 e 4, foram identificados elevados teores de tungstênio e ferro, demonstrando que o substrato está exposto. Devido à somatória destes fatores, trincas de origem mecânica e térmica podem ser geradas, originando a fragilização do material da ferramenta, o que possibilitou o aparecimento de microlascamentos.

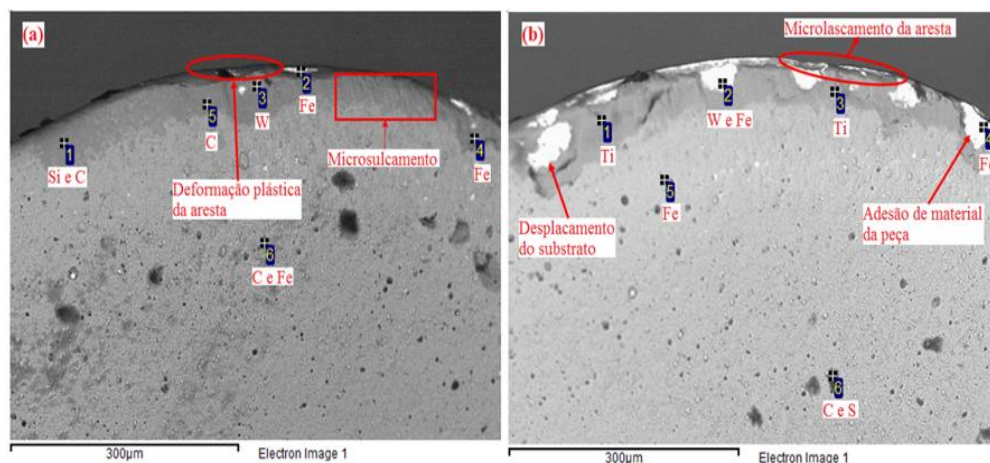


Figura 63 - Análise da composição EDX; superfície de saída: (a) terceiro intervalo de medição aresta 1; (b) quarto intervalo de medição aresta 3; ferramenta de corte revestida utilizando fluido de corte de base vegetal de Pinhão manso. Fonte: Autoria própria.

A análise EDX, nos pontos 3 e 5 da Figura 64 (a) identificou elevados valores de tungstênio, demonstrando que o substrato está exposto e não tem o auxílio da cobertura para o corte no final da vida da ferramenta. Na mesma Figura, nos pontos 4 e 5 a análise EDX mostrou regiões com elevados teores de ferro, principal componente do material do corpo de prova, demonstrando a ocorrência de adesões do material usinado na aresta de corte. Ainda na mesma Figura 64 (a) é possível a identificação de microlascamentos na aresta de corte que podem ser consequência de vários fenômenos: propagação de trincas originadas por fadiga mecânica e/ou térmica, as quais fragilizaram a cobertura do substrato; choques com partículas duras presentes no material do corpo de prova, causando fraturas localizadas na aresta; adesões de material do corpo de prova com posterior deslocamento, levando partes da cobertura do substrato. O aparecimento de microlascamentos na aresta de corte em função de fadiga mecânica e térmica é sustentado em função do processo e da dureza do material usinado.

Na Figura 64 (b) evidencia-se a presença de deformação plástica da aresta e desgaste de flanco da ferramenta. A deformação plástica da aresta ocorre em altas temperaturas, e o material escoia sujeito pelas forças de usinagem. Estas deformações plásticas também ocorrem em metais-duros. Nas análises de composição EDX nos pontos 4 e 6 é possível identificar elevados teores de ferro, principal componente do material do corpo de prova, demonstrando a ocorrência de adesão do material usinado na aresta de corte.

Ainda na Figura 64 (b) nos pontos 5 e 8 foram identificados elevados teores de tungstênio, demonstrando que o substrato está exposto e não tem o auxílio da cobertura.

Nas partes mais claras, no flanco da ferramenta, é possível identificar fortes ocorrências de deslocamento do revestimento de Nitreto de Titânio (TiN), demonstrando a exposição do substrato.

Análises EDX nas Figuras 64 (a) e (b) ao final de 2,88 m de material usinado, identificou valores expressivos de ferro, silício e carbono, principais elementos que compõem o material do corpo de prova, indicando que um dos principais mecanismos de desgaste e/ou avarias na aresta de corte foram os microlascamentos e as adesões e desgaste abrasivos.

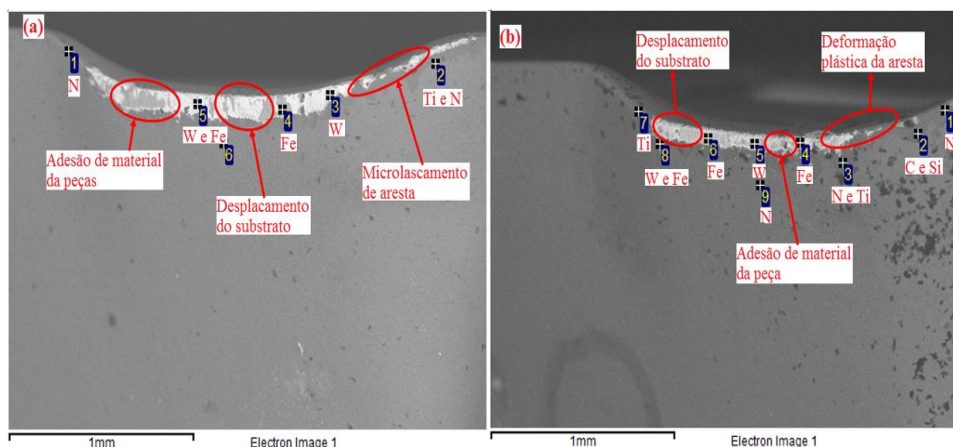


Figura 64 - Análise da composição EDX; desgaste de flanco: (a) terceiro intervalo de medição aresta 1; (b) quarto intervalo de medição aresta 3; ferramenta de corte revestida, utilizando fluido de corte de base vegetal de Pinhão manso. Fonte: Autoria própria.

Análises de composição EDX nos pontos 2, 3, 4 e 5 destacados na Figura 65 (a) indicam elevados teores de ferro, silício e carbono, elementos que compõem o material de corpo de prova, evidenciando o mecanismo de adesão na aresta. Ainda na Figura 65 (a) é possível afirmar que os principais mecanismos de desgaste e/ou avarias identificados nas arestas de corte foram os deslocamento do revestimento de Nitreto de Titânio (TiN), trincas de origem térmica e abrasiva. Na Figura 65 (a) é possível identificar regiões com fortes ocorrências de lascamento ou a quebra que podem ser o resultado de uma sobrecarga das tensões de tração mecânica. Estas tensões podem ocorrer por vários

motivos, profundidade de corte ou avanço muito alto, inclusão de partículas duras no material da peça, aresta postiça, vibrações ou desgaste excessivo na pastilha.

A análise EDX nos pontos 1, 2, 4, e 6 da Figura 65 (b) identificou valores expressivos de ferro, silício e carbono, elementos que compõem o material de corpo de prova, demonstrando a ocorrência de adesões do material usinado na aresta de corte. Na mesma Figura nas partes mais claras, na superfície de saída da ferramenta, é possível identificar fortes ocorrências de deslocamento do revestimento de Nitreto de Titânio (TiN), apresentando a exposição do substrato, tornando a superfície vulnerável à adesão de materiais do corpo de provas.

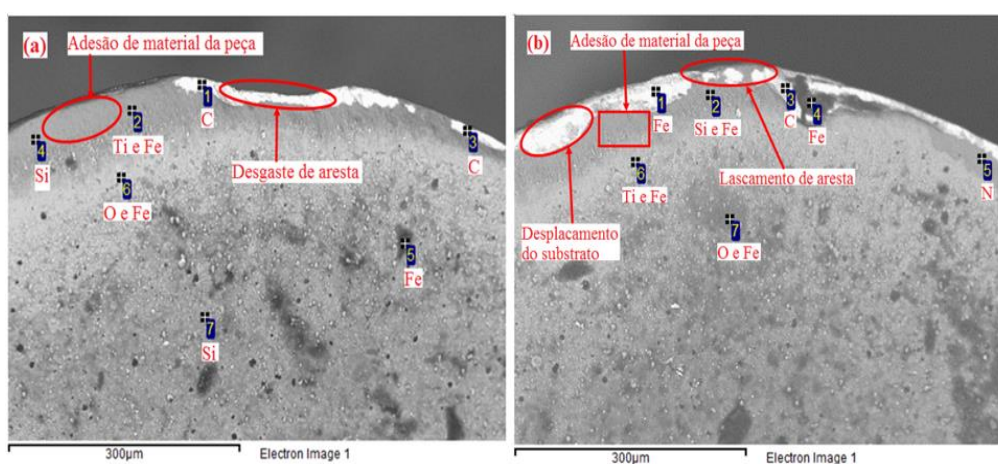


Figura 65 - Análise da composição EDX; superfície de saída: (a) terceiro intervalo de medição aresta 1; (b) quarto intervalo de medição aresta 3; ferramenta de corte revestida utilizando fluido de corte de base vegetal de Tungue.

Fonte: Autoria própria.

As Figuras 66 (a) e (b) apresentam as imagens das ferramentas de corte em MEV após a usinagem de 2,16 m de comprimento utilizando fluido de base vegetal de Tungue.

A Figura 66 (a), nos pontos 1, 2 e 3 mostram as composições químicas nas regiões desgastadas, onde podem ser identificados valores expressivos de ferro, silício e carbono, elementos que compõem o material de corpo de prova, demonstrando a ocorrência de adesões do material usinado na aresta de corte. Na mesma Figura 66 (a) pode ser identificada a presença de lascamento de aresta e desgaste na superfície de folga da ferramenta; evidencia-se a ocorrência intensa de deslocamento do revestimento de Nitreto de Titânio (TiN) em várias regiões da superfície de folga, apresentando a exposição do substrato. Nas imagens da mesma Figura podem ser vistas, regiões de

desgaste intenso, onde foram identificados valores expressivos de ferro, silício e carbono, elementos que compõem o material de corpo de prova, demonstrando a ocorrência de adesões do material usinado na aresta de corte, da ferramenta. As análises EDX nos pontos 2 e 3 da Figura 66 (b) mostram que houve adesão do material na superfície da ferramenta, principalmente do elemento ferro, o que confirma a ocorrência de adesão na superfície de folga da ferramenta. A ocorrência de elevados teores de tungstênio, indica que o substrato está exposto e não tem o auxílio da cobertura de Nitreto de Titânio (TiN) para o corte no final da vida da ferramenta.

Em determinados pontos da ferramenta na Figura 66 (b) é possível identificar fortes ocorrências de deslocamento do revestimento, apresentando a exposição do substrato. É possível visualizar as ocorrências de deformação plástica, as quais acontecem devido às altas temperaturas desenvolvidas na ponta da ferramenta. Na mesma Figura pode ser identificada a presença de lascamento parcial da aresta, desgaste e deslocamento em várias regiões da superfície de folga.

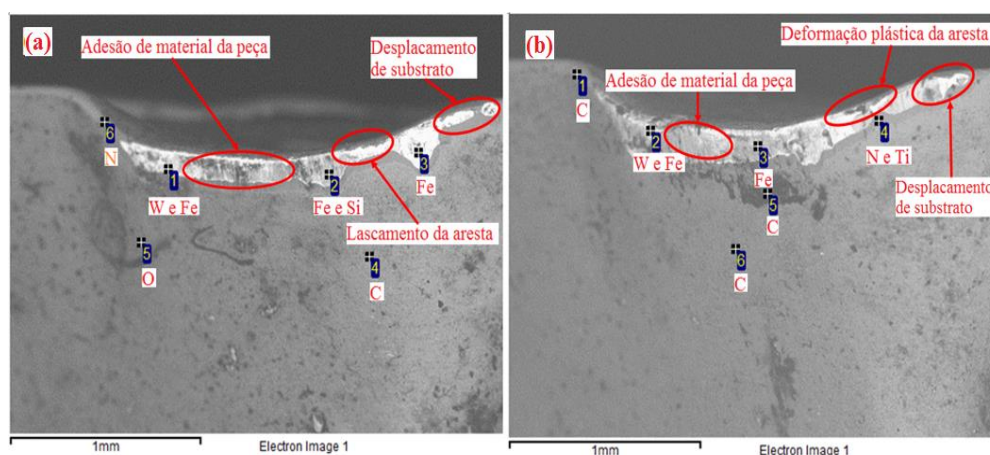


Figura 66 - Análise da composição EDX; desgaste de flanco: (a) terceiro intervalo de medição aresta 1; (b) terceiro intervalo de medição aresta 3; ferramenta de corte revestida, utilizando fluido de corte de base vegetal de Tungue.

Fonte: Autoria própria.

4.4.3 Análise EDX da Superfície dos Corpos de Prova

Nas imagens obtidas pelo MEV utilizou-se como critério de análise a visualização das irregularidades na superfície, sendo possível verificar com maior clareza a influência da estratégia de corte empregada sobre a textura resultante do corpo de provas usinado com ferramenta de metal duro revestido, utilizando fluido de Pinhão manso e Tungue.

Análises da composição EDX nos pontos destacados conforme mostrado na Tabela A. 22 e 23 do Apêndice A podem ser encontrados os valores referentes a composição química em porcentagem (%) nos pontos analisados da superfície do corpo de provas usinado com ferramenta de metal duro revestido.

A análise EDX do ponto 4 mostrado na Figura 67 (a) identificou, na superfície do corpo de provas, a presença do elemento químico Titânio, oriundo da ferramenta, o que evidencia a ocorrência de deslocamento do revestimento da ferramenta que foi incorporado à superfície do corpo de provas.

Na figura 67 (b) analisou-se a formação da textura, através das marcas originadas pela passagem da ferramenta e ação do gume que ao final dos intervalos, já havia comprometido a ação de corte; com a maior magnificação, observa-se a formação de micro rebarba. Esta ação pode ser resultante da condição em que a aresta se encontrava, com um pequeno desgaste, que em alta pressão contra a superfície da peça, provocou deformações plásticas da superfície do material. Nas Figuras 67 (a) e (b) é possível visualizar superfícies com fortes sinais de sulcamento possivelmente causadas por partículas abrasivas originadas do material do corpo de provas, provocando o desgaste abrasivo na ferramenta de corte. Durante o sulcamento, a simples passagem de uma partícula abrasiva não provoca a remoção de material da superfície que está sendo desgastada. Para esta condição também é possível identificar pequenas deformações, em toda superfície usinada, quando visualizadas com maior ampliação. Ao ocorrer a deformação plástica na ferramenta de corte pode provocar deficiência no controle de cavacos e deterioração do acabamento superficial da peça.

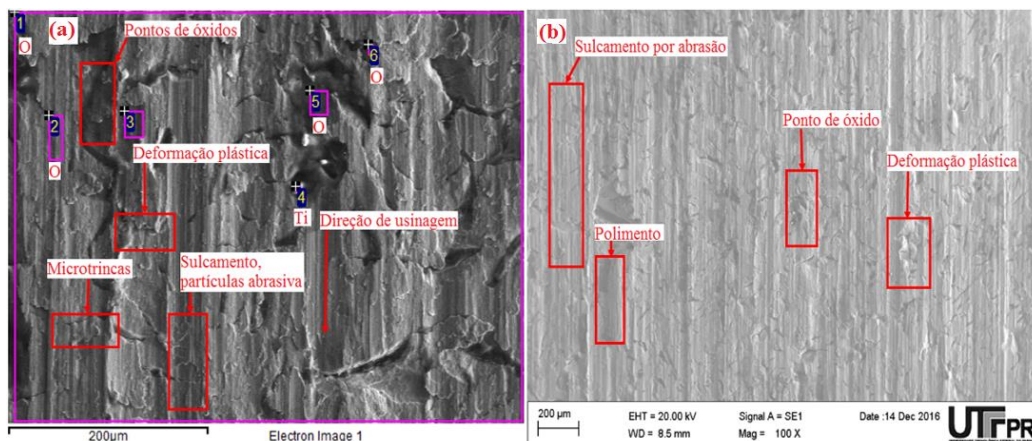


Figura 67 - Análise da composição EDX: (a) análise da composição química em porcentagem (%) nos pontos selecionados;(b) seleção de detalhes para análise de superfície do corpo de provas usinado utilizando fluido de corte de base vegetal de Pinhão manso. Fonte: Autoria própria.

O processo de fresamento produz um padrão de sulcos regular e repetitivo, com uma direção preferencial claramente observável, com sulcos bem definidos.

Na Figura 68 (a) é possível visualizar regiões com fortes deformações plásticas que ocorrem devido às altas temperaturas desenvolvidas na ponta da ferramenta e também é possível visualizar a ocorrência de sulcamentos por partículas abrasiva, onde não são provocada a remoção de material da superfície que está sendo desgastada, essas partículas são deslocadas para os lados, formando um sulco na superfície. A análise EDX do ponto 5 mostrado na Figura 68 (a) identificou, na superfície do corpo de provas, a presença do elemento químico Titânio, oriundo da ferramenta, o que evidencia a ocorrência de deslocamento do revestimento da ferramenta que foi incorporado à superfície do corpo de provas. Na Figura 68 (b) com a maior ampliação, observa-se a formação de micro rebarbas. Este material pode ser resultante da condição em que a aresta de corte se encontrava, com desgaste severo, que em alta pressão contra a superfície da peça, possibilitou deformações plásticas do material. É possível observar a existência de microtrincas que se limitam apenas às camadas superficiais de material. Na Figura 68 (b), é possível observar regiões com possíveis sulcamentos que podem ter se originado de fragmentos abrasivos do corpo de provas.

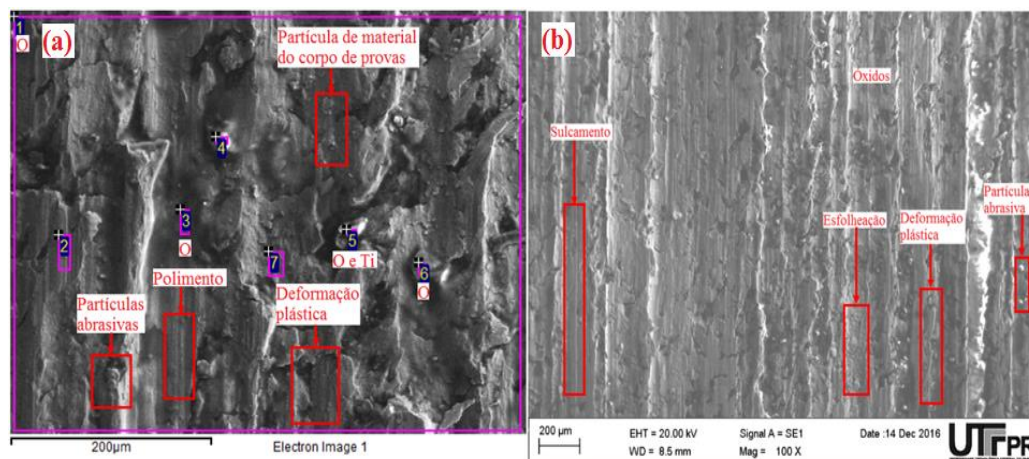


Figura 68 - Análise da composição EDX:(a) análise da composição química em porcentagem (%) nos pontos selecionados; (b) seleção de detalhe para análise de superfície do corpo de provas usinado utilizando fluido de corte de base vegetal de Tungue.
Fonte: Autoria própria.

4.4.4 Análise de Cavaco

Diversos problemas podem ocorrer em função do tipo de cavaco produzido no processo de usinagem. Controles de cavaco não-efetivos não resultarão apenas em baixa produtividade e pobre acabamento superficial de componentes, mas também poderão prejudicar ferramentas, máquinas e peças. Durante a formação do cavaco vários fatores ligados à usinagem são influenciados, como por exemplo, desgaste da ferramenta, calor gerado no processo, esforços de corte, penetração do fluido, dentre outros.

Imagens MEV de duas amostras de cavacos obtidas na usinagem empregando fluido de corte à base de Pinhão manso e Tungue são apresentada, respectivamente, nas Figuras 69 (a) e (b). Na Figura 69 (a) observa-se um cavaco obtido na usinagem com fluido de Pinhão manso, com sinais de sulcamento, possivelmente causado por partículas aderidas à superfície da ferramenta de corte, que ao deslizar o cavaco sobre a superfície áspera, imprime a ação abrasiva na superfície do cavaco. Na Figura 69 (b) observa-se um cavaco obtido na usinagem com fluido de Tungue, onde vê-se regiões com possível concentração de óxidos, originadas da ação do próprio fluido e de possíveis ação de temperaturas.

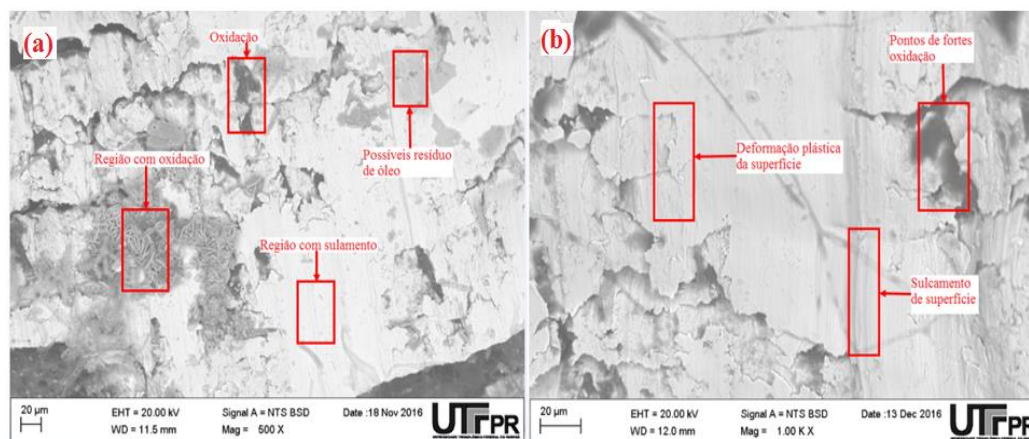


Figura 69 - Imagens em MEV: (a) cavaco usinado com fluido de corte utilizando Pinhão manso; (b) cavaco usinado com fluido de corte utilizando Tungue.
Fonte: Autoria própria.

4.4.5 Rugosidade Superficial

Nesta seção serão apresentados os resultados referentes a rugosidade superficial da peça em relação as variáveis utilizadas nos ensaios. Para tanto, como resposta de saída, foram captados três parâmetros de rugosidade (R_a , R_q e R_z).

Como é conhecido, existe um conjunto de fatores que tem influência sobre a textura e a integridade da superfície de uma peça usinada: o processo de fabricação; a geometria da ferramenta, especialmente o seu raio da ponta; a microestrutura e a composição química do material da peça; o desgaste da ferramenta de corte; os parâmetros de corte, com destaque para o avanço e a velocidade de corte e a instabilidade da máquina-ferramenta.

As Tabelas A.24 a A.29 do Apêndice A mostram os valores das médias dos parâmetros (μm), R_a , R_q e R_z de rugosidade para todos os intervalos de medição para a aresta 1, utilizando fluido de corte de base vegetal de Tungue e Pinhão manso, conforme foi estabelecido no planejamento experimental.

Analisando as Figuras 70, 71 e 72 pode-se observar que à medida que os intervalos de medição foram sendo realizados, os valores de rugosidade apresentaram-se de forma crescentes, mantendo uma proporcionalidade. Ao efetuar as medições de rugosidade, o desgaste foi apresentando-se de modo progressivo, o que refletiu-se no acabamento superficial do corpo de prova. Isso evidencia o fato de que a perda do revestimento, a adesão de materiais do corpo de provas na superfície da ferramenta e/ou

uma deterioração da aresta da ferramenta está diretamente relacionada aos resultados de texturas das superfícies. Na Figura 70, para a aresta 1, foi necessário usinar o comprimento de 2,16 m de material para ambos os fluidos para obter-se o desgaste máximo de flanco.

Como mostrado nas Figuras 70 (a) e (b), os valores de rugosidade R_a tanto para o fluido de Tungue como para o Pinhão manso, apresentaram valores médios de rugosidade próximos. Isto evidencia o comportamento dos fluidos que para esse parâmetro foram equivalentes.

Ao analisar as Figuras 70 (a) e (b) tem-se, ao final dos intervalos de medição, o valor médio de rugosidade R_a obtido para o fluido de Tungue com três intervalos de medição com uma rugosidade superficial de $0,57 \mu\text{m}$. Já para o fluido de Pinhão, também com três intervalos de medição, foi obtido a média final de $0,65 \mu\text{m}$, portanto um melhor acabamento superficial de $0,08 \mu\text{m}$ para o fluido de Tungue.

Na avaliação do parâmetro R_q , ao final dos intervalos de medição, o fluido de Tungue com três intervalos de medição, obteve uma média de rugosidade superficial de $0,72 \mu\text{m}$. Já para o fluido de Pinhão, o mesmo comprimento de material usinado, obteve uma média final de $0,86 \mu\text{m}$, portanto um melhor acabamento superficial de $0,14 \mu\text{m}$ para o fluido de Tungue.

Na avaliação do parâmetro R_z , ao final dos intervalos de medição, o fluido de Tungue com três intervalos de medição obteve uma rugosidade superficial de $4,05 \mu\text{m}$. Já o fluido de Pinhão com quatro intervalos de medição obteve média final de $4,63 \mu\text{m}$, portanto um melhor acabamento superficial de $0,58 \mu\text{m}$ para o fluido de Tungue.

Quando compara-se os parâmetros de rugosidade entre si, tanto para o fluido de Pinhão manso como para o Tungue, observa-se uma proporcionalidade ao final dos intervalos de medição. Quando a comparação é feita entre os fluidos, nota-se que essa proporcionalidade também se mantém constante.

Quando observa-se nos gráficos o comportamento dos parâmetros de rugosidade R_a e R_q , no decorrer dos intervalos de medição, nota-se um comportamento bastante semelhantes entre os fluidos.

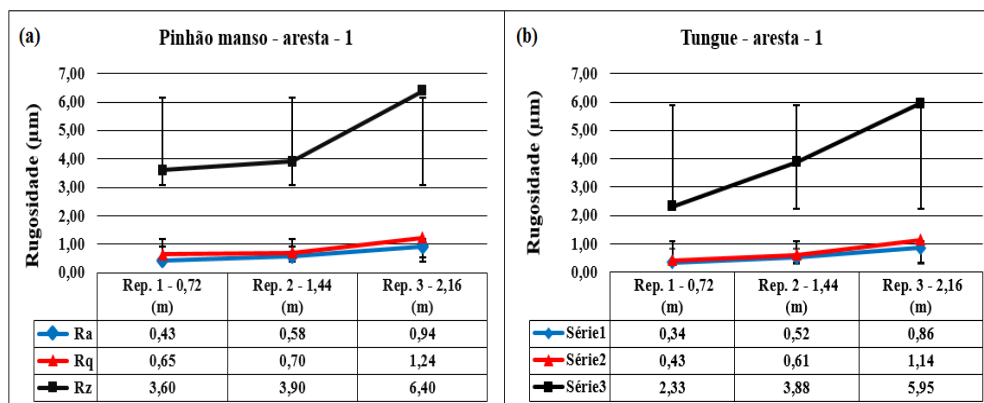


Figura 70 - Rugosidade superficial medida a cada intervalo de 0,72 m de material usinado: (a) com fluido de Pinhão manso; (b) com fluido de Tungue.
Fonte: Autoria própria.

As Figuras 71 (a) e (b) mostram a média dos resultados de rugosidade (parâmetros R_a , R_q e R_z) para todos os intervalos de medição da aresta 2, realizados de acordo com o planejamento experimental. Para a aresta 2, foram necessários usar o comprimento de 2,16 m de material para o fluido de Tungue e 2,88 m para o fluido de Pinhão manso.

Analisando a Figura 71, pode-se observar que os valores de rugosidade apresentaram-se de forma crescente, mantendo uma proporcionalidade entre os parâmetros avaliados. Ao efetuar os intervalos de medição a ferramenta foi apresentando desgaste, o que refletiu no acabamento superficial da peça. Isso evidencia o fato de que a perda do revestimento, a adesão de materiais do corpo de provas na superfície da ferramenta e/ou uma simples deterioração da aresta da ferramenta está diretamente relacionada aos resultados de texturas das superfícies.

As Figuras 71 (a) e (b) mostram que, ao final das medições tem-se, para o fluido de Tungue, com três intervalos de medição (ou seja, com 2,16 m de material usinado), uma rugosidade superficial (R_a) de 0,60 μm . Já para o fluido de Pinhão manso, após quatro intervalos de medição (com 2,88 m de material usinado) tem-se uma rugosidade (R_a) de 0,53 μm . Portanto, houve uma melhoria no acabamento superficial de 0,7 μm para o fluido de Pinhão manso.

Na avaliação do parâmetro R_q , ao final dos intervalos de medição, para o fluido de Tungue com três intervalos de medição, obteve-se uma rugosidade superficial de 0,81 μm . Já para o fluido de Pinhão manso com quatro intervalos de medição, obteve-se uma

média final de 0,69 μm , portanto uma melhora no acabamento superficial de 0,12 μm para o fluido de Pinhão manso.

Na avaliação do parâmetro R_z , ao final dos intervalos de medição, para o fluido de Tungue com três intervalos de medição, obteve-se uma rugosidade superficial de 4,67 μm . Já para o fluido de Pinhão manso, com quatro intervalos de medição, obteve-se média final de 4,04 μm . Portanto, uma melhora no acabamento superficial de 0,63 μm para o fluido de Pinhão manso.

Vale salientar que para a aresta 2, no ensaio com fluido de Pinhão manso, foram necessários quatro intervalos de medição, com um comprimento de material usinado de 2,88 m para alcançar o valor limite do desgaste de flanco estabelecido no planejamento, ou seja, um comprimento total de material usinado 33% superior, juntamente com valores de rugosidade superficial (R_a , R_q e R_z) comparativamente menores, em relação aos valores obtidos com fluido de Tungue.

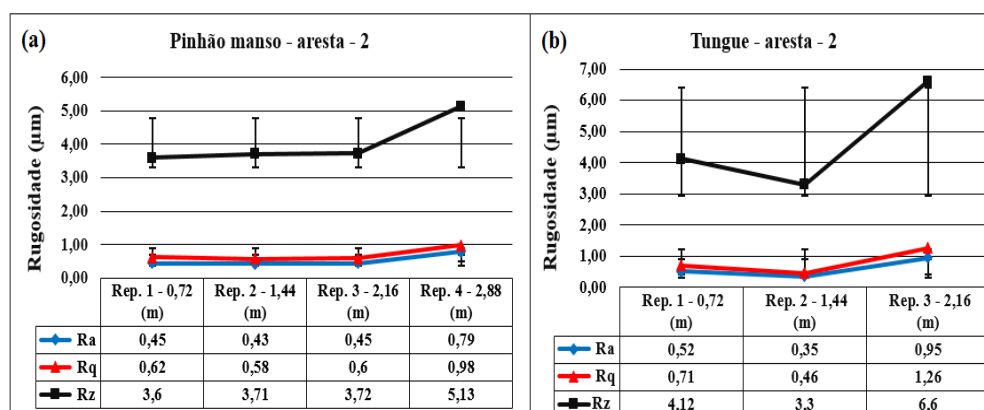


Figura 71 - Rugosidade superficial medida a cada intervalo de 0,72 m de material usinado: (a) com fluido de Pinhão manso; (b) com fluido de Tungue.

Fonte: Autoria própria.

Ao analisar as Figuras 72 (a) e (b) tem-se que, ao final dos intervalos de medição, o valor médio de rugosidade R_a obtido para o fluido de Tungue, com três intervalos de medição, foi de 0,57 μm . Já para o fluido de Pinhão, com quatro intervalos de medição, obteve-se média final de 0,45 μm , portanto uma melhora no acabamento superficial de 0,12 μm para o fluido de Pinhão manso.

Na avaliação do parâmetro R_q , ao final dos intervalos de medição, para o fluido de Tungue com três intervalos de medição, obteve-se uma rugosidade superficial de 0,77

μm . Já para o fluido de Pinhão manso, com quatro intervalos de medição, obteve-se média final de $0,60 \mu\text{m}$, portanto uma melhora no acabamento superficial de $0,17 \mu\text{m}$ para o fluido de Pinhão manso.

Na avaliação do parâmetro R_z , ao final dos intervalos de medição, para o fluido de Tungue com três intervalos de medição, obteve-se uma rugosidade superficial de $4,28 \mu\text{m}$. Já para o fluido de Pinhão manso, com quatro intervalos de medição, obteve-se média final de $3,54 \mu\text{m}$, portanto uma melhora no acabamento superficial de $0,74 \mu\text{m}$ para o fluido de Pinhão manso.

Na avaliação do acabamento superficial para a aresta 3, ensaiado com fluido de Pinhão manso, foram necessários quatro intervalos de medição, com um comprimento de material usinado de $2,88 \text{ m}$ para alcançar o desgaste de flanco estabelecido no planejamento. Já para o fluido de Tungue, foram necessários três intervalos de medição, com um comprimento total de material usinado de $2,16 \text{ m}$. Portanto, o fluido de Pinhão manso usinou um comprimento total 33% menor, com valores de rugosidade superficial (R_a , R_q e R_z) também menores, comparativamente aos valores obtidos com o fluido de Tungue.

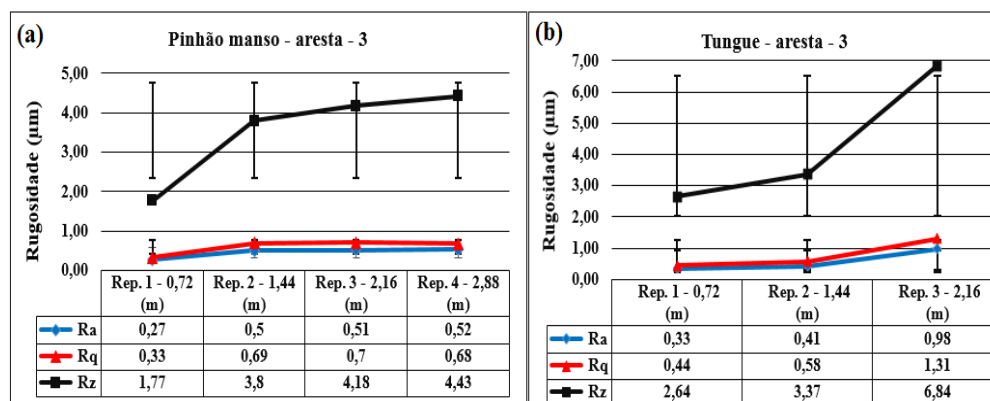


Figura 72 - Rugosidade superficial medida a cada intervalo de $0,72 \text{ m}$ de material usinado: (a) com fluido de Pinhão manso; (b) com fluido de Tungue.
Fonte: Autoria própria.

4.4.6 Consumo de Potência

Nesta seção serão apresentados e discutidos os resultados referentes ao consumo de potência, para verificar a influência das variáveis do processo sobre o desempenho dos fluidos.

Ampara et al. (2014), afirmaram que geralmente as análises de potências nas operações de usinagem são divididas em três etapas, as quais são:

- 1ª etapa: acionamento da máquina;
- 2ª etapa: movimentos de posicionamento das ferramentas;
- 3ª etapa: usinagem (contato ferramenta/peça).

Para tanto, como resposta de saída, no presente trabalho, a aquisição de potências foi um procedimento padronizado para todos os testes com emulsões de Pinhão manso e Tungue, do início até o fim da vida da ferramenta.

Ao longo da vida útil de uma ferramenta de corte, o desgaste progressivo de flanco também aumenta a força necessária para remover o cavaco (KONIG, 1997). Deste modo, a influência dos fluidos de corte sobre as forças de usinagem está diretamente relacionada ao aumento da capacidade de lubrificação do fluido ao longo da vida da ferramenta. Portanto, em uma ferramenta nova, com boa habilidade de corte, os esforços não deverão ser significativos quando comparado com alterações das condições de engajamento.

Nas Tabelas A 30 a A 35 do Apêndice A. podem ser encontrados os valores das médias das potências consumidas para todos os intervalos de medição, utilizando emulsões de Pinhão manso e de Tungue para as arestas 1, 2 e 3, conforme o que foi estabelecido no planejamento experimental.

A Figura 73 apresenta os resultados médios das potências para os três intervalos de medição para a aresta 1, com emulsões de Pinhão manso e Tungue. É possível observar o comportamento das emulsões quando avaliamos o consumo de potência ao longo dos intervalos de medição. Observa-se que a evolução da potência para realizar o corte, apresentou-se de forma semelhante, tanto para a emulsão de Pinhão manso como para a emulsão de Tungue, no decorrer dos intervalos de medição. Pode-se afirmar que o consumo de potência teve seu aumento à medida que a ferramenta de corte foi apresentado desgaste.

De forma semelhante ao desgaste da ferramenta, verifica-se o aumento da rugosidade da superfície do corpo de provas proporcionalmente ao aumento de potência. Os consumos de potências para as duas condições de fluidos, são comparados entre si, sempre utilizando os mesmos parâmetros de corte, com possibilidades de variação do comprimento usinado em função do comportamento de desgaste máximo de flanco da ferramenta. A cada intervalo de medição da ferramenta foram avaliadas as dimensões do desgaste, acabamento de superfície e consumo de potência. Este ciclo de aquisição foi repetido até que a ferramenta atingisse o desgaste máximo de 0,2 mm.

Desta forma foi usinado um comprimento máximo de material de 2,16 m para a aresta 1, com emulsões de Pinhão manso e Tungue. Ao analisar a Figura 73, pode-se observar que ao final do terceiro intervalo de medição, a emulsão de Tungue já havia atingido o desgaste máximo de flanco, com um consumo médio de potência de 14,80 Wh. Já para a emulsão de Pinhão manso, utilizando as mesmas condições, obteve-se 13,30 Wh. Portanto, para as condições de testes da aresta 1, a emulsão de Tungue apresentou um aumento no consumo final de potência de 1,5 Wh.

Quando compara-se as potências consumidas, tanto para a emulsão de Pinhão manso como para a emulsão de Tungue, observa-se uma potência consumida 11% maior para o Tungue em comparação com o Pinhão manso. Portanto, na avaliação da potência consumida, os resultados apontam para o Pinhão manso um melhor desempenho.

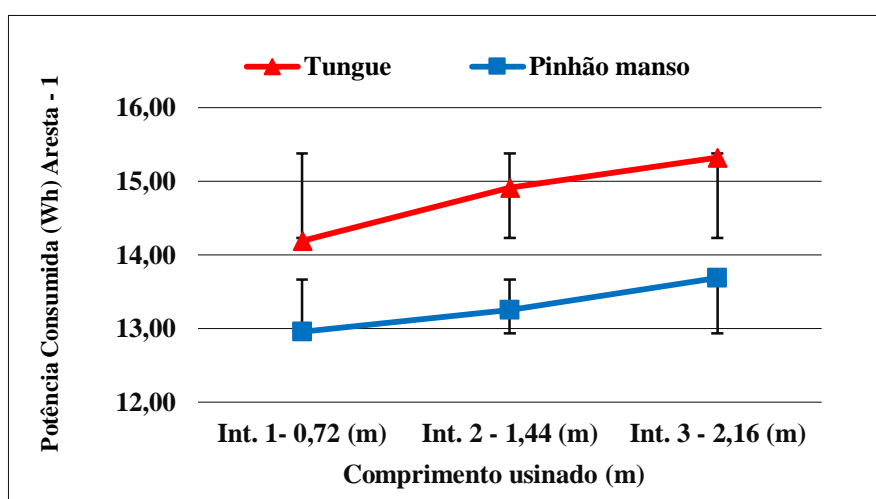


Figura 73 - Consumo de potência adquirido a cada intervalo de 0,72 m de material usinado com emulsões de base vegetal.

Fonte: Autoria própria.

Na Figura 74, tem-se os resultados das médias das potências para os quatro intervalos de medição, para a emulsão de Pinhão manso e três intervalos de medição para a emulsão de Tungue para os testes com a aresta 2. Os valores de potência consumida foram aquisitados a cada intervalo de 0,72 m de material usinado para aresta 2, que atingiu 2,16 m para o Tungue e 2,88 m para o Pinhão manso.

Na avaliação das potências consumidas, pode-se observar que ao final da terceira repetição com 2,16 m de material usinado a emulsão de Tungue havia alcançado o valor limite do desgaste máximo de flanco, com um consumo médio de potência de 14,49 Wh. Já para a emulsão de Pinhão manso, nas mesmas condições de teste, foram necessários quatro intervalos de medição, com um comprimento de material usinado de 2,88 m e com consumo médio de potência de 13,33 Wh. Portanto, para as condição de testes para aresta 2, a emulsão de Pinhão manso apresentou um comprimento de material usinado 33% superior, com um consumo médio de potência, 8,7% menor. Quando observa-se os valores de consumo das potências, é possível afirmar que a emulsão de Pinhão manso apresentou desempenho melhor tanto no volume de material usinado como no consumo de potência, quando comparado com a emulsão de Tungue.

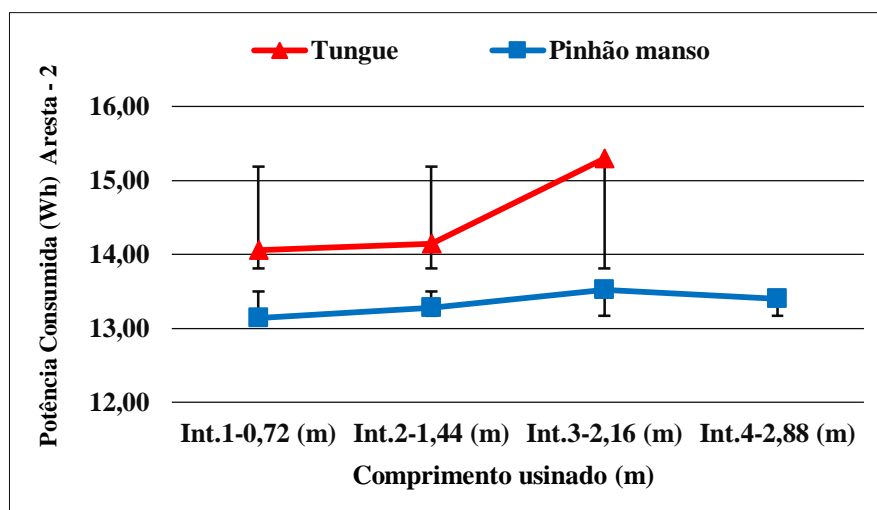


Figura 74 - Consumo de potência aquisitado a cada intervalo de 0,72 m de material usinado com emulsões de base vegetal.

Fonte: Autoria própria.

A Figura 75 apresenta as médias de consumo de potência, utilizando emulsões de Tungue e Pinhão manso para a aresta 3. São comparados entre as emulsões, e o número de intervalos de medição, sempre utilizando os mesmos parâmetros de corte, podendo variar

apenas o comprimento usinado em função do comportamento do desgaste máximo de flanco da ferramenta. A cada intervalo de medição, foram avaliadas as dimensões do desgaste até que atingissem o desgaste máximo de 0,2 mm, caso contrário os intervalos de medição continuariam até alcançar este valor limite de desgaste da ferramenta. Desta forma tem-se um comprimento máximo para a aresta 3 de 2,16 m de material usinado para a emulsão de Tungue e de 2,88 m de comprimento para o Pinhão manso. Quando avalia-se o consumo de potência nos três intervalos para a emulsão de Tungue e quatro intervalos de medição para a emulsão de Pinhão manso, mantendo os mesmos parâmetros para ambas as emulsões, observa-se que ao final do terceiro intervalo de medição, a emulsão de Tungue já havia alcançado o desgaste máximo de flanco, com consumo médio de potência de 14,44 Wh. Já para a emulsão de Pinhão manso, nas mesmas condições de teste, para alcançar o desgaste máximo de flanco foram necessários quarto intervalos de medição, com consumo de potência de 13,29 Wh. Portanto, para as condições de testes para aresta 3, a emulsão de Pinhão manso apresentou um desempenho de material usinado 33% maior com um consumo de potência 8,7% menor, quando comparado com a emulsão de Tungue.

Analisando os comportamentos dos gráficos, observa-se uma situação bastante equilibrada no decorrer dos intervalos de medição para a emulsão de Pinhão manso com evolução lenta no consumo de potência. Considerando a emulsão de Tungue, o gráfico apresenta uma inconstância em todos os intervalos de medição, com evolução acentuada ao final dos intervalos.

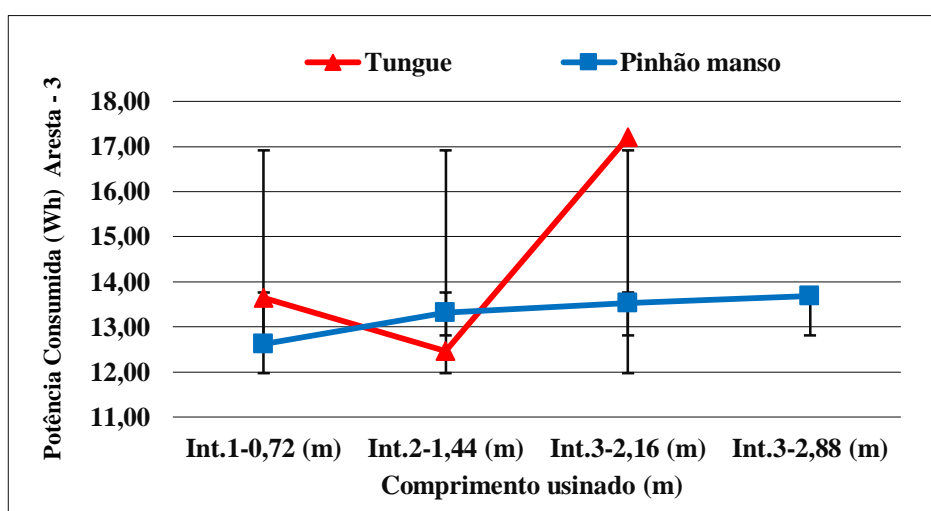


Figura 75 - Consumo de potência adquirido a cada intervalo de 0,72 m de material usinado com emulsões de base vegetal.

Fonte: Autoria própria.

5 CONCLUSÕES

À partir dos resultados obtidos neste trabalho, pode-se retirar as seguintes conclusões:

- Considerando as perdas de massa dos pinos empregando os óleos in natura, o melhor desempenho ficou para o óleo de Tungue, com média final de 0,06 g, seguido pelo Pinhão manso com 0,08 g, portanto uma diferença inferior de 0,02 g (ou 25,0%) para o óleo de Tungue, quando comparado com o óleo de Pinhão manso;
- Para as áreas de desgaste dos pinos empregando os óleos in natura, o melhor desempenho ficou para o óleo de Tungue, com média final de 38,53 mm², seguido pelo Pinhão manso com média final de 38,87 mm², portanto, uma diferença inferior de 0,34 mm² para o óleo de Tungue quando comparado com o óleo de Pinhão manso;
- Para as temperaturas dos corpos de provas empregando os óleos in natura, o óleo de Tungue apresentou média final de 48,02 °C, seguido pelo Pinhão manso com média final de 41,27 °C, portanto, diferença inferior de 6,75 °C (ou 14,06 %) para o óleo de Pinhão manso quando comparado com o óleo de Tungue;
- Para as temperaturas dos fluidos empregando os óleos in natura, o óleo de Tungue apresentou média final de 39,05 °C, seguido pelo Pinhão manso com média final de 44,81 °C, portanto uma diferença inferior de 5,76 °C (ou 12,9 %) para o óleo de Tungue quando comparado com o óleo de Pinhão manso;
- Para as perdas de massa, as emulsões dos óleos vegetais de Tungue e Pinhão manso apresentaram comportamentos iguais, com média final de 0,03 g para ambos os fluidos;
- Para as áreas das elipses, a média final foi de 18,80 mm² para a emulsão de Pinhão manso e de 18,85 mm² para a emulsão de Tungue; portanto, uma diferença inferior de 0,05 mm² para a emulsão de Pinhão manso;
- Para as temperaturas dos corpos de provas, a média final foi de 26,79 °C para a emulsão de Pinhão manso e de 24,91 °C para a emulsão de Tungue; portanto, uma diferença inferior de 1,88 °C para a emulsão de Tungue;
- Para as temperaturas dos fluidos, a média final foi de 31,85 °C para a emulsão de Pinhão manso e de 32,75 °C para a emulsão de Tungue; portanto, uma diferença inferior de 0,9 °C para a emulsão de Pinhão manso.

- Os fluidos emulsificados de Pinhão manso e Tungue apresentaram variações no comprimento de material usinado, portanto, pode-se observar divergências de rendimento para as arestas de corte. Para primeira aresta, todos os itens (desgaste máximo de flanco, rugosidade superficial e consumo de potência) apresentaram rendimentos muito próximos, com poucas diferenças entre os itens avaliados.

- O principal mecanismo de desgaste apresentado pela usinagem de ferro fundido CGI, tanto empregando a base vegetal de Tungue quanto o Pinhão manso como fluido de corte, foi o desgaste por abrasão, e o tipo predominante de desgaste foi o desgaste de flanco. Também foi notória a ocorrência de adesão tanto no flanco como na superfície de saída das ferramentas. Em alguns casos, notou-se deslocamento do substrato seguido de lascamentos e quebra das arestas de corte das ferramentas, observados com maior incidência na usinagem usando fluido de base vegetal de Tungue.

- A maior vida da ferramenta foi conseguida empregando o fluido de corte de base vegetal de Pinhão manso. Comparando os dois fluidos de corte de base vegetal, na primeira aresta de corte foi obtido um rendimento de 10% superior na vida da ferramenta empregando a base vegetal de Tungue; enquanto que, contrariamente, os testes das duas arestas seguintes resultaram em um rendimento 70% maior na vida da ferramenta empregando a base vegetal de Pinhão manso.

- Considerando a rugosidade superficial do corpo de prova, na aresta 1, foram obtidos valores menores de rugosidade para a base vegetal de Tungue em todos os parâmetros de rugosidade avaliados (R_a , R_q e R_z). Já para aresta 2, foram obtidos valores menores de rugosidade para a base vegetal de Pinhão manso em todos os parâmetros avaliados. Para a aresta 3, foram obtidos valores menores de rugosidade para a base vegetal de Pinhão manso em todos os parâmetros avaliados. Portanto, os valores de rugosidade resultaram predominantemente menores empregando o fluido de corte à base de Pinhão manso.

- Para as condições de ensaios da aresta 1, o Tungue apresentou um acréscimo no consumo final de potência em média de 11,5% com um comprimento de material usinado 10% menor em comparação com a base vegetal de Pinhão manso. Já para aresta 2, a base vegetal de Pinhão manso apresentou um comprimento de material usinado 70% maior, com um consumo de potência 8,7% menor. Para aresta 3, a base vegetal de Pinhão manso apresentou um comprimento de material usinado 70% superior, com um consumo de potência 8,7% menor. Portanto, considerando o consumo de potência e a vida da

ferramenta, pode-se concluir que a base vegetal de Pinhão manso apresentou resultados superiores em relação à base vegetal de Tungue.

- De modo geral, a base vegetal de Tungue apresentou rendimento inferior quando comparada com a base vegetal de Pinhão manso. Isto pode ser justificado em razão da base vegetal de Tungue não apresentar aditivos que possam contribuir na melhoria de rendimento. Nos ensaios tribológicos por meio do *Reichert Test*, a base de Tungue apresentou rendimentos muito próximos com a base de Pinhão manso, tanto no estado in natura como na base emulsificada. Quando comparados os ensaios de área da elipse, de perda de massa, de temperatura dos corpos de provas e de temperaturas dos fluidos, principalmente quando a base vegetal foi aplicada na forma de emulsão, é possível afirmar que os resultados dos dois fluidos se equivalem.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros:

- Analisar o comportamento do fluido para outros tipos de materiais e também outros tipos de ferramentas;
- Testar aditivos antiespumantes, estabilizantes de Ph, bactericidas e aditivos de extrema pressão;
- Testar e comparar outras concentrações e tipos de fluido de corte de base vegetal, variações de parâmetros de usinagem e outras formas de aplicação de fluidos;
- Buscar parceria com outras áreas para obter maiores informações sobre o comportamento físico-química dos fluidos;
- Repetir os ensaios de usinagem por meio de operações de torneamento.

REFERÊNCIAS

ABDULKARIM, S. M.; LONG, K.; LAI, O. M. **Frying quality and stability of high-oleic Moringa oleifera seed oil in comparison with other vegetable oils.** *Food Chem.* v. 105, p. 1382-1390, 2007.

ABNT **NBR 6175** Usinagem – Processos mecânicos estabelecem a nomenclatura, a definição e a classificação dos processos mecânicos de usinagem 1971.

ABNT **NBR ISO 4287**, Especificações geométricas do produto (GPS) – Rugosidade: método do perfil – Termos, definições e parâmetros de rugosidade. ABNT, 2002.

ABNT **NBR 6162**, Define os termos empregados nos movimentos e relações geométricas na usinagem dos metais. 1989.

AGUIAR, J. S. **Atividade antimicrobiana de Lippia alba (Mill.) N. E. Brown (Verbenaceae).** Braz. J. Pharmacogn. v.18, n.3, p.436-440, 2008.

ALBERTIN, E. **Efeito da porcentagem de carbonetos e da microestrutura da matriz metálica sobre a resistência ao desgaste de ferros fundidos branco de alto cromo – Ensaios em moinhos de bola.** Tese apresentada a Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1993.

ALTERA, F. A. **Desgaste abrasivo de Níquel e de Liga Binária Níquel-Cobalto Eletro depositados em Substrato de Cobre.** Dissertação, Apresentada a Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. REDEMAT. 2009.

ALVES, F. R. **Desenvolvimento de um Tribômetro, Tipo Cilindro Sob Disco, Para Ensaios Tribológicos em Formulações com Óleos Vegetais.** P.23. Dissertação Apresentada à Faculdade de Engenharia – UNESP – Campus de Ilha Solteira. 2014.

ALVES, S. M. **Adequação Ambiental do Processo de Retificação Através de um Novo Conceito de Fluido de Corte.** Tese (doutorado), 199 f., Departamento de Engenharia Mecânica, EESC/USP, São Carlos. 2005.

AMPARA, A.; PAUL T. M.; **Critical factors in energy demand modelling for CNC milling and impact of tool path strategy.** Journal of Cleaner Production, pp. 63-74, 2014.

ARBAIN, N. H.; SALIMON, J. **Synthesis and Characterization of Ester Trimethylolpropane Based Jatropha Curcas Oil as Biolubricant Base Stocks.** *J. Sc.Tech.* v. 2, p. 47–58, 2011.

ASM **International, Metals Handbook: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-purpose Materials**, 10th Ed.1990 Vol. 2.

ASM. **Speciality handbook: cast irons.** Estados Unidos: ASM International, 1996, p. 33-267. Consalter, L. A.; Guedes, L. C.; Purey, J. A. Usinabilidade de Ferros Fundidos. FMP Guia de Equipamentos e Insumos, p. 39-45, Out., 1987.

ASTM- **Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus;** Designation: G 99 – 95a (Reapproved 2000). Disponível em <https://bungkusbakwan.files.wordpress.com/2015/02/g99.pdf>. Acessado em Janeiro 2016.

ÁVILA, D. T. **A cultura do tungue (Aleurites fordii) no Rio Grande do Sul :** Caracterização de Populações, Propagação e Desempenho Agronômico; Universidades Federal de Pelotas; 2010.

BARRETO, M. B.; BEZERRA, A. M. E.; FREITAS, J. V. B.; GRAMOSA, M. V.; NUNES, E. P.; SILVEIRA, E. R. **Constituintes químicos voláteis e não-voláteis de Moringa oleifera Lam., Moringaceae.** Revista Brasileira de Farmacognosia. João Pessoa, v. 19, n. 4, p. 893-897, out/dez., 2009.

BAYER, R. G. **Wear Analysis for Engineers.** New York: HNB, 2002.

BHUSHAN, Bharat. **Introduction to Tribology.** John Wiley & Sons: New York, 732 p., 2002.

BOCKISCH, M. **Nonedible oils and fats.** In: AOCS Books and Special Publications. Fats and Oils Handbook. Second edition. Illinois: AOCS Press, 1998. p. 311-316.

BRISCOE, B. J.; SINHA, S. K. **Polymer tribology.** Singapore. 2009.

CAKIR, M. C., ENSARIOGLU, C., DEMIRAYAK, I. **Mathematical modeling of 130 ribolog roughness for evaluating the effects of cutting parameters and coating material.** Journal of Materials Processing Technology, v. 209, ed. 1, pp. 102-109, Jan. 2009.

CARDOSO, K. P.; SOUZA, J. F.; SOUZA, M. C.; KAWACHI, E. Y.; GOMES, J. O. **Caracterização do óleo de Pinhão-manso como base para fluidos lubrificantes.** II Congresso Brasileiro de Pesquisas de Pinhão-Manso. Brasília, 2011.

CARDOSO, K. P. **Óleo de Pinhão-manso e fluido de corte emulsionável: estabilidade oxidativa e propriedades lubrificantes.** Tese de mestrado – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, Brasil. 108f., 2012.

CARDOSO, K. P. **Óleo de Tungue Fluido de Corte Emulsionável:(Teste de Bancada)** Centro de Competência em Manufatura (CCM), Laboratório de Pesquisa Localizado no Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA) 2016.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e Ferros Fundidos.** Características Gerais, Tratamento Térmico, Principais Tipos. 7ª Edição Ampliada e Revisada, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais. 2005.

CIMM – Centro de Informação Metal Mecânica. <Http:www.cimm.com.br> Acesso em: fevereiro de 2016.

COSTA, F. de A. (2006). **Capoeiras, Inovações e Tecnologias Rurais Concorrentes na Amazônia.** In: Costa, F. de A., Hurtienne, T. P., Kahwage, C. Inovação e Difusão Tecnológica para Sustentabilidade da Agricultura Familiar na Amazônia. Belém, E. NAEA. 21- 60.

DAWSON, S. – **The Sintercast Process Control For the Production of Compacted Graphite iron –** Based on A presentation Made at the 106th AFS Casting Congress Kansas City 4–7 May 2002.

DIAS, L. A. S., LEME, L. P.; LAVIOLA, B. G.; PALLINI FILHO, A.; PEREIRA, O. L.; CARVALHO, M.; MANFIO, C. E.; SANTOS, A. S.; SOUSA, L. C. A.; OLIVEIRA, T. S. & DIAS, D. C. F. S. **Cultivo de pinhão-manso (Jatropha curcas L.) para produção de óleo combustível.** Viçosa, MG, 2007. V.1. 40p.

DIN 5030. **Análise sistemática dos processos de desgaste.** Classificação dos fenômenos de desgaste. Metalurgia & Materiais,53 (1997). P619-622.

DIN 50320 Desgaste - Termos - Análise de sistemas de processos de desgaste - Classificação do campo de desgaste. 1979.

DINIZ, A. E.; COPPINI, N. L.; VILELLA, R. C.; RODRIGUES, A. C. S. – **Otimização das condições de usinagem em células.** Máquinas e Metais, junho, 1989.

DINIZ, A. E., MARCONDES, F. C. e COPPINI, N. L., **Tecnologia da usinagem dos metais,** 3. Ed.; São Paulo-SP, Artliber, 2002.

DORÉ, C.; BOEHS, L.; GUESSER, L. W. **Avaliação da Usinabilidade do Ferro Fundido Vermicular com Diferentes Microestruturas**. 8th Congresso Iberoamericano de Engenharia Mecânica. 2007.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Zoneamento agroclimático da cultura do Tungue na Região Sul do Brasil**: Boletim de pesquisa e desenvolvimento 358, Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2012. Disponível em: <http://www.cpact.embrapa.br>, acessado em janeiro de 2016.

ERHAN, S. Z, SHARMA, B. K., LIU, Z., ADHVARYU, A. **Lubricant Base Stock Potential of Chemically Modified Vegetal Oils**. *J. Agric. Food Chem.* v.19, p. 8919-8925, 2008.

ESPLAR. **Centro de Pesquisa e Assessoria**. Consórcio Agroecológico 2006.

FANG, L., KONG, X. L., SU, J. Y, ZHOU, Q. D., **Movement patterns of abrasive particle in three-body abrasion**, *Wear* volume 162 – 164, pp 782 – 789, 1993.

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. V. 1, ed. 13, São Paulo, Edgard Blucher LTDA, 2009.

FREITAS, B. M. **Desgaste de Ferramenta e Otimização da Velocidade de Corte na Usinagem do Aço Inoxidável Austenítico 304L com Fluido Vegetal** - UFRJ/COPPE Rio de Janeiro: 2013.

FUGLIE, L. J. **The Miracle Tree: *Moringa oleifera*: Natural Nutrition for the Tropics**. Church World Service, Dakar. 68 pp.; revised in 2001 and published as *The Miracle Tree: The Multiple Attributes of Moringa*, 172 pp, 1999.

GAHR, KARL-HEINZ ZUM. **Microestrutura and wear of materials**. Tribology series, v10. Amsterdam: Elsevier, 1987. P.560.

GATS, J. D. **Two-body and Three-body abrasion: a critical discussion**, *Wear*, v.214, p.664-281, 2001.

GIRARDI, J. S.; **Produção de Biodiesel por Processo não Catalítico com Etanol Supercrítico a Partir do Óleo de Tungue (*Vernicia fordii*) Bruto e *in Situ***. Tese de Doutorado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

GOLFETTO, N. C. **Estudo e aplicação da amêndoa do Tungue (*Aleurites fordii*) na produção do biodiesel**, *Revista Científica da Faculdade de Educação e Meio Ambiente*. V. 2. P. 55-68. Nov-abr. 2011.

GOMES, R. C.; PIUBELI, F. A.; BIANCHI, E. C., ARRUDA, O. S., THOMÉ, R.; AGUIAR, P. R. **Correlações entre baixas temperaturas e o controle da confirmação microbiológica nos fluidos de corte**. *Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecânica*. V. 12, p. 35-41, 2008.

GONÇALVES, J. F. S. **Proposição de método de desenvolvimento de fluido de corte de base vegetal**. Tese de doutorado – Instituto tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos. 2013.

GONÇALVES, J. F. S.; SOUZA, M. C.; LUTIF, S. Y. S.; CARDOSO, K. P.; GOMES, J. de O.; MARQUES, Y. **COMPORTAMENTO TRIBOLÓGICO DO ÓLEO DE MORINGA EM ENSAIOS DE ATRITO POR DESLIZAMENTO**. In: V Encontro Nacional de Moringa oleifera, Maringá. 2014.

GRUSZYNSKI, C. **Resíduo agroindustrial “Casca de Tungue” como componente de substrato para plantas**. 2002. 99 f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

GUESSER, W. L.; GUEDES, L. C. **Desenvolvimentos recentes em ferros fundidos aplicados à indústria automobilística**. In: *Anais do IX Simpósio de Engenharia Automotiva*. AEA, São Paulo, 1997.

GUESSER, W. L. **Propriedades Mecânicas dos Ferros Fundidos**, 1a. ed., São Paulo, Editora Blucher, 2009.

HALLING, J. **Principles of Tribology**, Editora Macmillan Press Ltd, Londres, 401., Inglaterra, 1975.

HELLER, J. Physic nut (*Jatropha curcas* L.). **Promiting the conservation and use of underutilized and neglected crops** 1. IBPGR 161. Roma, IBPGR, 1996. 66p.

HWANG, H.-S., ADHVARYU, A. ERHAN, S. Z. **Preparation and properties of lubricant basestocks from epoxidized soybean oil and 2-ethylhexanol**. *J. Am. Oil. Chem. Soc.* v. 80, n. 8, p. 811-815, 2003.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Banco de Dados Agregados. **Culturas permanentes** 2014.

ISO 3685. **Tool Life Testing with Single Point Turning**, ISO 1993.

ISO 4287:1997. **Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface texture: Profile method – Terms, definitions and surface texture parameters**.

ISO 8688-1: **Teste de Vida de Ferramentas no Fresamento**. 1989.

JOST, H. P. **Tribology-origin and future**, *Wear*, v.136, pp.1-17. Kato, K. Adachi, K., 2001, *Wear Mechanisms*, MODERN TRIBOLOGY HANDBOOK, Ed. CRC Press LLC Vol.2 Cap. 22. 1990.

KAHR – HEINZ ZUM GAHR. **Microstructure and wear of materials**. Amsterdam: *Tribology series-Elsevier*, v.10, 560 p., 1987.

KALPAKJIAN, S. **Manufacturing Engineering and Technology**. 3ª ed., Reading: Addison-Wesley Publishing Company, 1296p. 1995.

KATO, K. ADACHI, K. **Wear Mechanisms**, MODERN TRIBOLOGY HANDBOOK, Ed. CRC Press LLC Vol. 2 Cap. 22. 2001.

KEGG, R. L. **On-line machine and process diagnostics**. *Annals of the CIRP*, v.32, p. 479-481, 1984.

KEJELIN, Z. N. COMELI, W. F. **Estudo da resistência ao desgaste erosivo e corrosivo de diferentes materiais depositados por aspersão térmica a arco: Uma aplicação em aquecedores tubulares do CTJL**.2013.

KÖNIG, W.; KLOCKE, F. **Fertigungsverfahren: drehen, fräsen, bohren**. 5ª ed., Berlin: Springer, 1997.

KURODA, M. **Aumentando a lucratividade com óleos vegetais**, *O Mundo da Usinagem*, 3ª. Edição, pp. 14-15,2006.

LEITE, M. V.; FIGUEROA, C. A.; BAUMVOL, I. J. R.; BASSO, R. L. O. MEI, P. R.; SINATORA, A. **Desgaste e Atrito da Camada Nitretada do Aço ABNT H 13 Nitretado por Plasma Pulsado**. *Tecnol. Metal. Mater. Miner.*, São Paulo, v. 6, n. 2, p. 67-72, out.-dez. 2009.

LUDEMA, K. C. **Friction, Wear Lubrication: a textbook in tribology [S.I]**: CRC press, 1996.

LUTIF, S. Y. S SOUZA, M. C. GONÇALVES, J. F.; CARDOSO, K. P. GOMES, J. O., **Comportamento do Óleo de Moringa em Análises de Lubrificação Utilizando Tribômetro Reichert Test**. Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA, Centro de Competência em Manufatura – CCM, / Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Divisão de Engenharia Mecânica. *Revista Tecnológica – Edição Especial* 2014.

MACHADO, A. R.; BHATTACHARYYA, S. K. **Usinagem de Aços com Fresas de Facear e Insertos de Carbetto**. Máquinas & Metais, n.301, p.94 - 103, fevereiro 1991.

MACHADO, A. R.; DINIZ, A. E. **Vantagens e desvantagens do uso (ou não) de fluidos de cortes**. Máquinas e Metais, São Paulo, p. 134-151, 2000.

MACHADO, A. R.; COELHO, R. T.; ABRÃO, A. M.; DA SILVA, M. B. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. Ed. Edgard Blücher, São Paulo, 384 p. 2009.

MACHADO, L. M.; COLOMÉ, J. S.; BECK, C. L. C. **Estratégia de Saúde da Família e o Sistema de Referência e de Contra-Referência: um desafio a ser enfrentado**. Ver. Enferm. UFSM, vol.1, n. 1, pp. 31-40. Jan/Abr, 2011.

MADRONA, G. **Estudo da extração/purificação do composto ativo da semente da Moringa Oleifera Lam e sua utilização no tratamento de água de abastecimento**. Encontro Nacional da Moringa. Maringá, 2009.

MAIA, E. L. Material Didático Teórico – **Tecnologia do Pescado I**, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2006.

MANG, T.; DRESEL, W. **Lubricants and lubrication**. Wiley-VCH Verlag GmbH, 2nd Ed., Weinheim, Germany, 2007, 850 p.

MARCELINO, A. P.; DOMINGOS, D. C.; CAMPOS D. V.; SCHROETER R. B. **Medição e simulação dos esforços de usinagem no fresamento de topo reto de ligas de alumínio tratável termicamente 6061**. In: CONGRESSO ESTUDANTIL DE ENGENHARIA MECÂNICA – CREEM, Nova Friburgo. Anais... Nova Friburgo: Instituto Politécnico da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2004.

MELO, J. C.; BRANDER JUNIOR, W.; CAMPOS, R. J. A.; PACHECO, J. G. A.; SCHULER, A. R. P.; STRAGEVITCH, L. **Avaliação preliminar do potencial do pinhão manso para a produção de biodiesel**. 2006.

MITUTUYO; Catálogo, disponível em <http://www.mitutoyo.com.ar/nueva/lancamentos/pdf/MANUAL-SJ-210.pdf>. Acessado em maio de 2016.

MOERLOOZE, K. **Contributions to the Characterization of Friction and Wear**. Tese de doutorado, 150p., Catholic University of Leuven, Belgica, 2010.

MORETTO, E.; FETT, R. **Definição de óleos e Gorduras tecnologia de óleos e gorduras vegetais na indústria de alimentos**. São Paulo. Varela, 144 p. 1998.

NAYYAR V., KAMINSKI J., KINNANDER A., NYBORG L. **An Experimental Investigation of Machinability of Graphitic Cast Iron Grades; Flake, Compacted and Spheroidal Graphite Iron in Continuous Machining Operations**. In: 5th CIRP Conference on High Performance Cutting 2012, CIRP 1 p. 488 – 493, 2012.

NAVA, D. E., ZANARDI, O. Z.; MELO, M.; SILVA, S. D. A. **Insetos Praga e Benéficos na Cultura do Tungue**. Embrapa Clima Temperado. Dezembro, 2009.

OLIVEIRA, D. S.; FONSECA, X. D. S.; FARIAS, P. N. BEZERRA, V. S.; PINTO, C. H. C.; SOUZA, L. D.; SANTOS, A. G. D.; MATIAS, L. G. O. **Obtenção de biodiesel através da transesterificação do óleo de Moringa Oleífera Lam**. Holos, ano 28, v. 1. 2012.

OLIVEIRA, J. F.; ALVES, S. M. **Adequação ambiental dos processos de usinagem utilizando Produção mais Limpa como estratégia de gestão ambiental**. *Prod.*, v. 17, p. 129-138, 2007.

PANTALEON, E. M. **Modelo de desgaste oxidativo baseado em parâmetros termodinâmicos**. Teses de Doutorado – Escola Politécnica – Universidade de São Paulo, 2004.

PARK, K. H., KWON, P. Y. **Flank wear of multi-layer coated tool**. *Wear*, v. 270, ed. 11-12, pp. 771-780, Mai 2011.

PEREIRA, A. A. **Análise do desgaste da ferramenta à base de β -Si₃N₄ na usinagem do ferro fundido cinzento FC 250 utilizando técnicas avançadas e de alta resolução**. 226 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2010.

PINHÃO MANSO; disponível em; <http://www.pinhaomanso.com.br/fotos-jatropha.html>; acessado em maio de 2016.

PUTTEN, E. V., FRANKEN, Y. J., JONGH, J. de. **Manual de Jatropha** – Versión en Español. Sección 1: Datos generales de la Jatropha. FACT Foundation, p. 7-14, 2009.

RABINOWICZ, E. **Friction and Wear of Materials**. New York, John Wiley and Sons (DESGASTE) 1995).

RADI, P. A; SANTOS, L. V.; BONETTI, L. F.; TRAVA-AIROLDI, V. J; **Tribologia, Conceitos e Aplicações**. Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, São Paulo, Brasil, 2007.

REGNEY, D. A. **Comments on the sliding wear of metals**. *Tribology International*, v.30, p.361–367, 1997.

RIBAS, H. I. **Resistência ao Desgaste de Metais Duros Sem Cobalto**. Dissertação submetida à Universidade Federal de Santa Catarina para Obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica. Florianópolis, S/C. 1991.

RIBEIRO, E. P.; SERAVALLI, E. A. G. **Química de Alimentos**. São Paulo: Edgard Blücher, 2004.

RODRIGUES, M. M.; LUTIF, S. Y. S.; SOUZA, M. C.; CARDOSO, K. P.; BORILLE, A. V.; KAWACHI, E. Y. **Avaliação de óleos vegetais e derivados**. 15º Congresso de Tecnologia da Fatec, São Paulo, 2013.

ROMI. **Catálogo técnico** Centros de usinagem vertical linha ROMI D, 2014.

RUNGE, P. R. F.; DUARTE, G. N. **Lubrificantes nas Indústrias-Produto-Manutenção e Controle**. Cotia-SP: Triboconcept Edição Técnicas, p.71-171. 1990.

SALIH, N.; SALIMON, J.; YOUSIF, E. **Synthetic biolubricant basestocks based on environmentally friendly raw materials**. *J. King Saud Univ., Science*. v. 24, Issue 3, p. 221– 226, 2011.

SANDVIK **COROMANT**. Disponível em: http://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/milling/getting_started/general_guidelines/cutter_position/pages/default.aspx. Acesso em: 22 Jan. 2016.

SCHULZ, H. **Sichere Fraswerkzeuge fur die Hochgeschwindigkeit-Bearbeitung**, Werkstatt und Betrieb, 128, p532-536, 1995.

SECCO, D. C., MATSUMOTO, H., RODRIGUES, A. R., OLIVER, A. C., BARRIOS, A. N. S. **Análise Lubrificante de Fluidos de Corte**. 7º congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação; Penedo, Itatiaia – RJ – Brasil. 2013.

SHABTAY, D.; KASPI, M. **Optimization of machining economics problem under the failure replacement strategy**. International Journal of Production Economics, v.80, ed. 3, pp. 213-230, Dez. 2002.

SHAMES, I. H. **Mecânica dos Fluidos** – volume 1. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1999. 192 p.

SHAW, M. C. **Metal cutting principles**. New York: Oxford Science Publications, 1984. 594 p.

SINATORA, A. **Tribologia: um resgate histórico e o estado-da-arte**. 33 f. Erudição (Professor Titular) Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2005.

SINTERCAST. **Compacted Graphite Iron**. Technical Publication. What is CGI? Disponível em: <<http://www.sintercast.com/Tecnology>> Acesso em: janeiro de 2016.

SOUTO, U. B. **Monitoramento do desgaste de ferramenta no processo de fresamento via emissão acústica**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Uberlândia, 2007.

SOUZA, M. C.; E. CARDOSO, K; **Teste de bancada**; emulsão de Tungue: Centro de Competência em Manufatura (CCM), laboratório de pesquisa localizado no Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA).2016.

SOUZA, M. C. D.; SOUZA, J. F. D.; GOMES, J. D. O. **Estudo de viabilidade de reutilização de fluido lubrificante em processos das indústrias metalmeccânicas**. VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica - CONEM. São Luis - Maranhão, p. 8. 2012.

SOUZA, J. F., GOMES, J. O., SOUZA, J. **Vegetal-based Cutting Fluids Evaluation in Drilling Compact Graphite Iron I**. In: 16th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering (LCE 2009), Cairo. Life Cycle Engineering in the Sustainability Age. 2009.

SPINELLI, V. M.; ROCHA, R. B.; RAMALHO, A. R.; MARCOLAN, A. L.; VIEIRA JÚNIOR, J. R.; FERNANDES, C. F.; MILITÃO, J. S. L. T.; DIAS, L. A. S. **Componentes primários e secundários do rendimento de óleo de pinhão-manso**. Ciência Rural, Santa Maria, 2010.

SREEJITH, P. S., NGOI, B. K. A. **Dry machining**: Machining of the future. Journal of Materials Processing Technology, v. 101, ed. 1-3, pp. 287-291, Abr. 2000.

STACHOWIAK, Gwidon W.; Batchelor, Andrew W. **Engineering Tribology**. 2.ed. Butterworth-Heinemann: Boston, 744 p., 2001.

STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte I**. 6. Ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 2005.

STEMMER, C. E. **Ferramentas de Corte II**. Universidade Federal de Santa Catarina Florianópolis, 3ª ed. 2005.314.p.

STOETERAU, R. L. **Análise da Influência do Material sobre o Desgaste da Ferramenta de Usinagem** 2007.

SUSKI, C. A. **Estudo do efeito de tratamentos e revestimentos superficiais na vida de ferramentas de conformação mecânica à frio**. Dissertação Submetida à Universidade Federal de Santa Catarina Para a Obtenção do Grau de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais. Florianópolis, 2004.

TERCHECI, M.; MANORY, R. R.; HENSLER, J. H. **The friction and wear automotive Grey cast iron under dry sliding conditions**. Part 1 Relationships between wear loss and testing parameters. Wear. N 180, p 73-78, 1995.

TOH, C. K. **Comparison of chip surface temperature between up and down milling orientations in high speed rough milling of hardened steel.** Journal of Materials Processing Technology, Amsterdam, v. 167, n. 1, p. 110-118, 2005.

TRENT, E. M., WRIGHT, P. K. **Metal cutting**, 4th Edition, Butterworth - Heinemann, London, 2000, 446 p.

WALKER, J. R. **Machining Fundamentals.** USA, Goodheart-Willcox Company, Jan. 2004.

WANG, J. **Development of a chip flow model for turning operations.** International Journal of Machine Tools & Manufacture, v.41, p.1265-1274, 2001.

WEINGAERTNER, W. L.; SCHROETER, R. B. **Tecnologia da Usinagem com Ferramentas de Corte de Geometria Definida – Parte I.** Tradução do livro “Fertigungsverfahren – Drehen, Bohren, Fräsen” de Wilfried König e Fritz Klocke, Florianópolis, 2002.

WILLIAMS, J. **Engineering Tribology.** 1 Ed. New York: Cambridge University Press, 2005.

WINDSOR: LCE, v. 1. p. 421-427. 2009.

WOODS, S., **Going green – Vegetable oil-based metalworking fluids can provide better performance and environmental results than mineral oil-based fluids.** Cutting Tool Engineering Magazine, Volume 57, no 2, February, pp. 47-53, 2005.

VOGL, F. W., **Estudo do Comportamento da Liga AA7050-T74 em Operações de Usinagem por Torneamento.** Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade de Taubaté, 2007.

XAVIOR, M. A. ADITHAN M. **Determinar a Influência de Fluidos de Corte no Desgaste da Ferramenta e Rugosidade da Superfície Durante a Rotação do ASSI 304 Aço Inoxidável Austenítico.** J Mater Processo Technol 209(2):900-909.2009.

ZORNITTA, N. **Tung (Aleurites fordii) – Avaliação do Potencial Energético do Fruto e do Biodiesel.** 50f. (Mestrado Acadêmico) – Universidade Estadual do Oestedo Paraná – UNIOESTE. Cascavel, 2014.

ZUM-GAHR, K-H., 1987, Microstructure and Wear of Materials, Tribology Series, 10, Elsevier, pp. 1-6, citado por: SUSKI, C.A., **Estudo do Efeito de Tratamentos e Revestimentos Superficiais na Vida de Ferramentas de Conformação Mecânica à Frio.** Dissertação de mestrado. UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA. 2004.

APÊNDICE A

1) Ensaios Realizados com Óleos de Base Vegetal com Água

A Tabela A.1 mostra a estimativa de custo das bases in natura, custos dos insumos e custo final/litro.

Tabela A.1 - Custos estimados para emulsificar 150 litros e o custo final por litro.

Óleo/Emulsão	Custo do óleo bruto/litro(R\$)	Quantidade/litro	Valor total (R\$)	Valor final/litro(R\$)
Óleo de Pinhão Manso	59,00	3,5	206,50	1,38
Óleo de Tungue	49,00	18	882,00	7,87
Tensoativo	45,84	6,5	298,00	
Mineral	23,50	7,5	176,25	1,18

Fonte: Madelâminas; Destilaria Bauru (2017).

A Tabela A.2 mostra os resultados dos ensaios *Reichert Test* para as repetições realizadas com Água para o pino A – 1.

Tabela A.2 - Ensaios realizados com Água A - 1: Pino 1.

Tipo de (Bio) Lubrificante	Amostra Pino - 1	Peso Inicial (g)	Peso Final (g)	Temp. Inicial Flu. °C.	Temp. Inicial C.p. °C.	Temp. Final Flu. °C.	Temp. Final C. p. °C.	Perda de Massa (g)
Água A - 1	A1-Rep. 1	15,80	15,68	24,60	21,00	56,40	45,50	0,12
	A1-Rep. 2	15,68	15,60	28,88	21,38	59,56	42,27	0,08
	A1-Rep. 3	15,60	15,49	28,49	21,95	63,97	44,29	0,11
	A1-Rep. 4	15,49	15,43	37,30	27,00	65,32	48,10	0,06

Fonte: Autoria própria.

A Figura A.1 mostra as imagens das faces desgastadas dos corpos de provas para os ensaios realizados com água, para o pino 1, nas quais podem ser observadas as dimensões das áreas das quatro faces desgastadas.

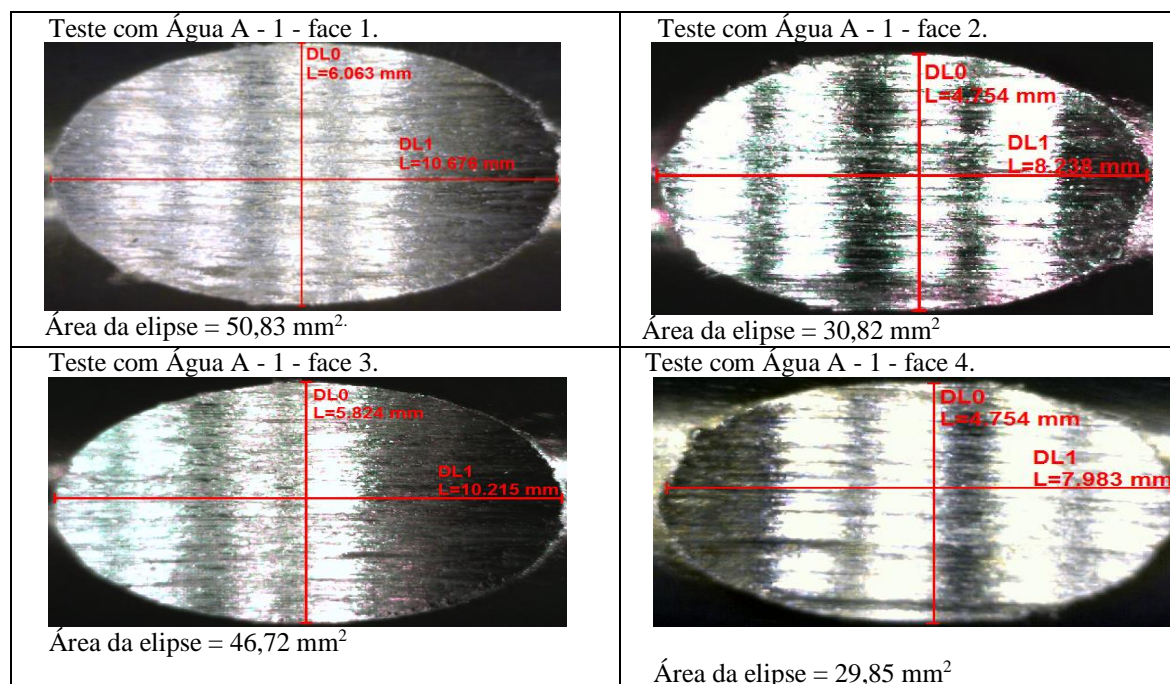


Figura A.1 - Imagens do pino desgastado, ensaios com Água: A - 1 pino 1.

Fonte: Autoria própria.

A Tabela A.3 mostra os resultados dos ensaios *Reichert Test* para as repetições realizadas com Água para o pino A - 2.

Tabela A.3 - Ensaios realizados com Água A - 2: Pino 2.

Tipo de (Bio) Lubrificante	Amostra Pino - 2	Peso Inicial (g)	Peso Final (g)	Temp. Inicial Flu. °C.	Temp. Inicial C.p. °C.	Temp. Final Flu. °C.	Temp. Final C. p. °C.	Perda de Massa (g)
Água A - 2	A2-Rep. 1	15,80	15,70	30,10	21,93	63,84	46,89	0,10
	A2-Rep. 2	15,70	15,58	30,62	21,18	66,76	45,1	0,12
	A2-Rep. 3	15,58	15,51	31,35	23,18	61,92	42,39	0,07
	A2-Rep. 4	15,51	15,38	30,50	23,30	64,17	47,92	0,13

Fonte: Autoria própria.

A Figura A.2 mostra as imagens das faces desgastadas dos corpos de provas para os ensaios realizados com água, para o pino 2, nas quais podem ser observadas as dimensões das áreas das quatro faces desgastadas.

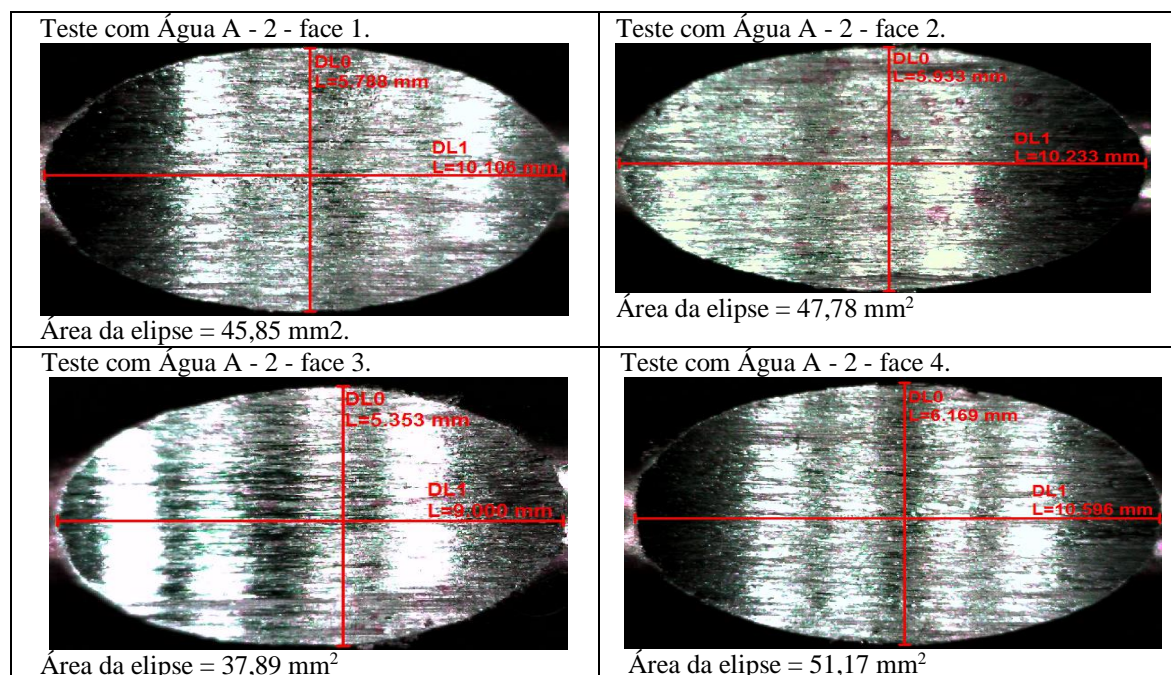


Figura A.2 - Imagens do pino desgastado, ensaios com Água: A - 2 pino 2.
Fonte: Autoria própria.

A Tabela A4 mostra os resultados dos ensaios *Reichert Test* para as repetições realizadas com Pinhão manso in natura para o pino A - 1.

Tabela A.4 - Ensaio realizado com óleo de Pinhão manso A - 1: Pino 1.

Tipo de (Bio) Lubrificante	Amostra Pino - 1	Peso Inicial (g)	Peso Final (g)	Temp. Inicial Flu. °C.	Temp. Inicial C.p. °C.	Temp. Final Flu. °C.	Temp. Final C. p. °C.	Perda de Massa (g)
Pinhão Manso A - 1	A1-Rep. 1	15,76	15,64	20,62	19,98	70,64	60,32	0,11
	A1-Rep. 2	15,64	15,57	34,27	28,48	66,79	57,00	0,07
	A1-Rep. 3	15,57	15,54	27,90	23,93	36,18	36,81	0,03
	A1-Rep. 4	15,54	15,48	25,57	23,21	51,51	56,00	0,06

Fonte: Autoria própria.

A Figura A.3 mostra as imagens das faces desgastadas dos corpos de provas para os ensaios realizados com óleo de Pinhão manso in natura para o pino 1, nas quais podem ser observadas as dimensões das áreas das quatro faces desgastadas.

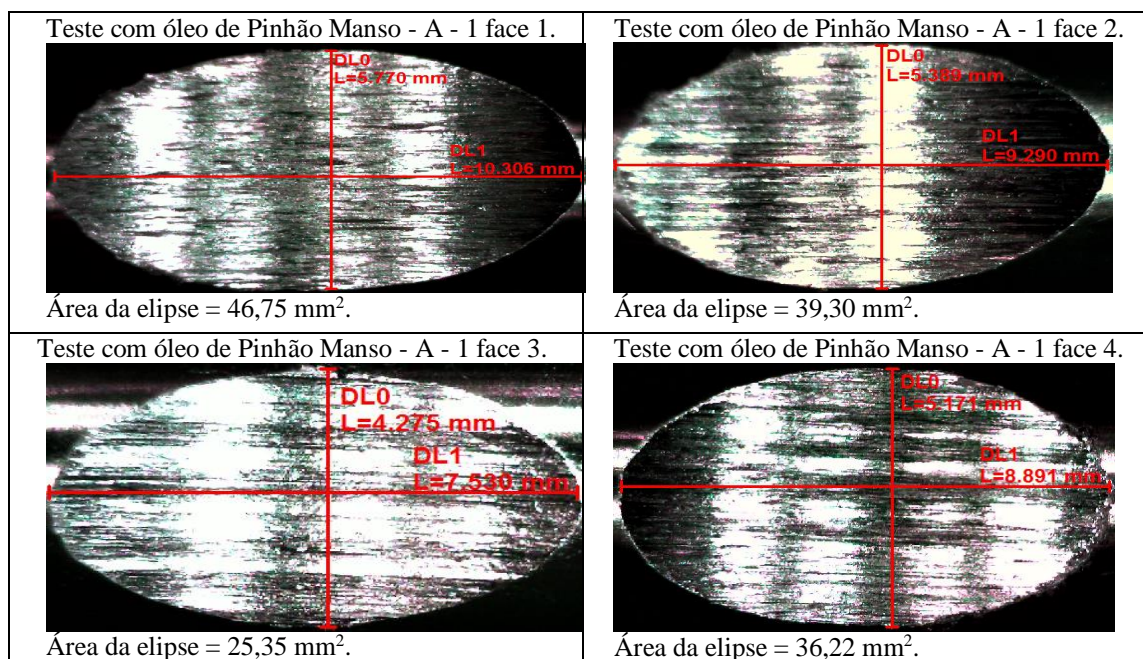


Figura A.3 - Imagens do pino desgastado, ensaios com óleo de Pinhão manso: A - 1 pino 1.
Fonte: Autoria própria.

A Tabela A.5 mostra os resultados dos ensaios *Reichert Test* para as repetições realizadas com pinhão manso in natura para o pino A - 2.

Tabela A.5 - Ensaios realizados com óleo de Pinhão manso A - 2: Pino 2.

Tipo de Lubrificante	Amostra Pino - 2	Peso Inicial (g)	Peso Final (g)	Temp. Inicial Flu. °C.	Temp. Inicial C.p. °C.	Temp. Final Flu. °C.	Temp. Final C. p. °C.	Perda de Massa (g)
Pinhão Manso A - 2	A2-Rep. 1	15,80	15,69	20,29	17,28	69,45	53,90	0,11
	A2-Rep. 2	15,69	15,62	27,44	22,72	57,88	49,73	0,07
	A2-Rep. 3	15,62	15,55	26,57	21,91	56,38	53,64	0,07
	A2-Rep. 4	15,55	15,44	19,19	16,15	69,48	54,12	0,11

Fonte: Autoria própria.

A Figura A.4 mostra as imagens das faces desgastadas dos corpos de provas para os ensaios realizados com óleo de pinhão manso in natura para o pino 2, nas quais podem ser observadas as dimensões das áreas das quatro faces desgastadas.

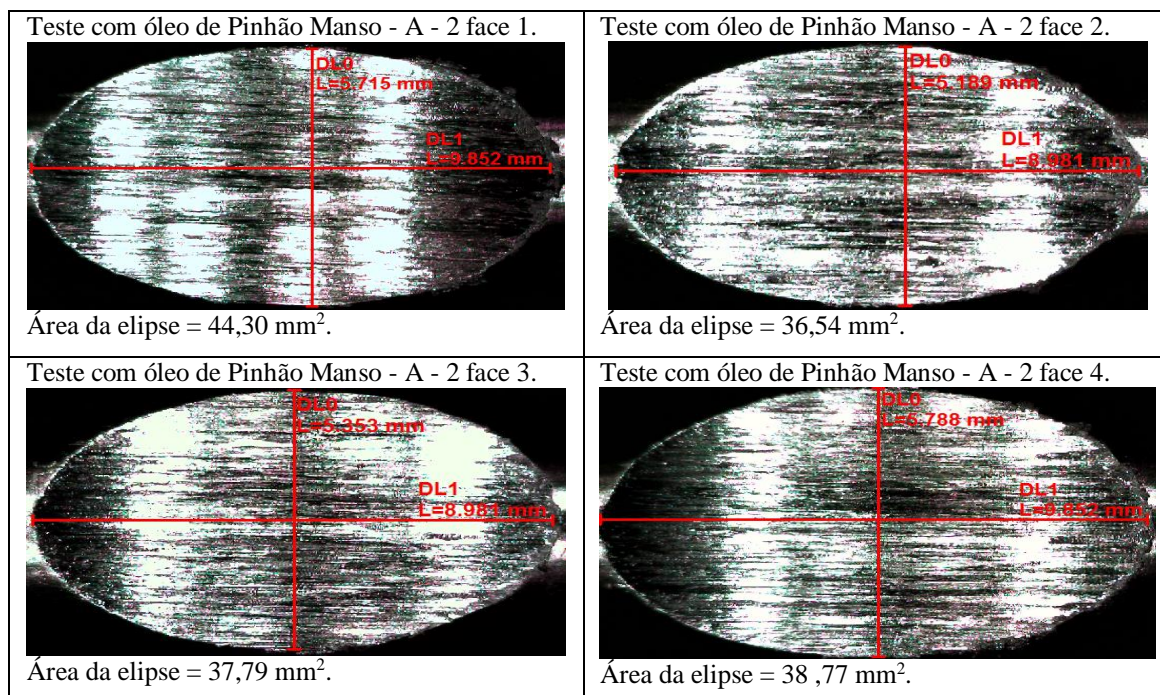


Figura A.4 - Imagens do pino desgastado, ensaios com óleo de Pinhão manso: A - 2 pino 2.
Fonte: Autoria própria.

A Tabela A.6 mostra os resultados dos ensaios *Reichert Test* para as repetições realizadas com óleo de Tungue in natura para o pino A - 1.

Tabela A.6 - Ensaios realizados com óleo de Tungue A - 1: Pino 1.

Tipo de (Bio) Lubrificante	Amostra Pino - 1	Peso Inicial (g)	Peso Final (g)	Temp. Inicial Flu. °C.	Temp. Inicial C.p. °C.	Temp. Final Flu. °C.	Temp. Final C. p. °C.	Perda de Massa (g)
Tungue A - 1	A1-Rep. 1	15,77	15,68	20,58	19,80	57,49	58,40	0,09
	A1-Rep. 2	15,68	15,60	31,70	24,23	56,86	59,74	0,08
	A1-Rep. 3	15,60	15,54	26,23	22,47	34,56	45,38	0,06
	A1-Rep. 4	15,54	15,47	30,99	24,56	55,4	59,00	0,07

Fonte: Autoria própria.

A Figura A.5 mostra as imagens das faces desgastadas dos corpos de provas para os ensaios realizados com óleo de Tungue in natura para o pino 1, nas quais podem ser observadas as dimensões das áreas das quatro faces desgastadas.

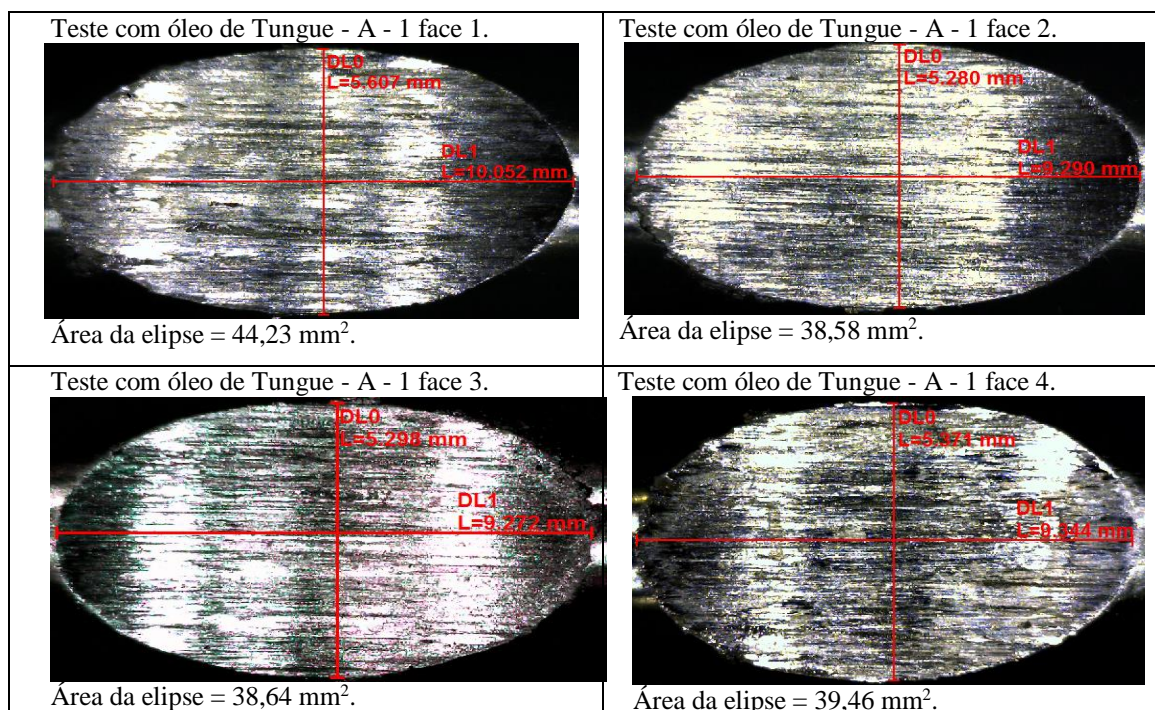


Figura A.5 - Imagens do pino desgastado, ensaios com óleo de Tungue: A - 1 pino 1.
Fonte: Autoria própria.

A Tabela A.7 mostra os resultados dos ensaios *Reichert Test* para as repetições realizadas com óleo de Tungue in natura para o pino A - 2.

Tabela A.7 - Ensaios realizados com óleo de Tungue A - 2: Pino 2.

Tipo de (Bio) Lubrificante	Amostra Pino - 2	Peso Inicial (g)	Peso Final (g)	Temp. Inicial Flu. °C.	Temp. Inicial C.p. °C.	Temp. Final Flu. °C.	Temp. Final C. p. °C.	Perda de Massa (g)
Tungue A - 2	A2-Rep. 1	15,75	15,69	19,41	16,85	47,10	52,22	0,06
	A2-Rep. 2	15,69	15,62	26,48	20,84	44,29	52,48	0,07
	A2-Rep. 3	15,62	15,54	28,71	23,92	57,00	62,64	0,08
	A2-Rep. 4	15,54	15,49	23,84	32,68	45,24	53,00	0,05

Fonte: Autoria própria.

A Figura A.6 mostra as imagens das faces desgastadas dos corpos de provas para os ensaios realizados com óleo de Tungue in natura para o pino 2, nas quais podem ser observadas as dimensões das áreas das quatro faces desgastadas.

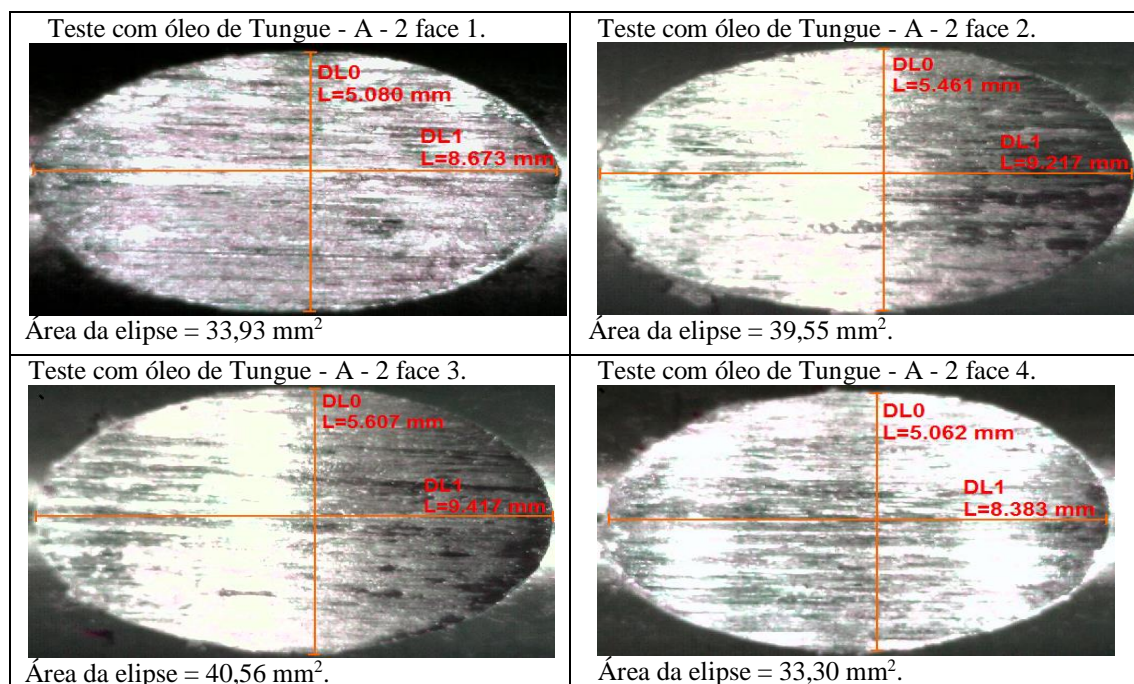


Figura A.6 - Imagens do pino desgastado, ensaios com óleo de Tungue: A - 2 pino 2.

Fonte: Autoria própria.

2) Ensaios Realizados com Óleo de Base Vegetal Emulsificado

A Tabela A.8 mostra os resultados dos ensaios *Reichert Test* para as repetições realizadas com óleo de Tungue emulsificado para o pino A - 1.

Tabela A.8 - Ensaios realizados com Tungue A - 1: Pino 1.

Tipo de (Bio) Lubrificante	Amostra Pino 1	Peso Inicial (g)	Peso Final (g)	Temp. Inicial Flu.	Temp. Inicial C.p.	Temp. Final Flu.	Temp. Final C. p.	Perda de Massa (g)
Tungue A - 1	A1-Rep .1	15,79	15,74	20,07	17,00	32,22	24,38	0,05
	A1-Rep .2	15,74	15,71	28,42	20,30	33,97	25,83	0,03
	A1-Rep .3	15,71	15,69	25,78	18,99	29,06	27,74	0,02
	A1-Rep .4	15,69	15,66	25,40	18,61	34,76	26,00	0,03

Fonte: Autoria própria.

A Figura A.7 mostra as imagens das faces desgastadas dos corpos de provas para os ensaios realizados com óleo de Tungue emulsificado para o pino 1, nas quais podem ser observadas as dimensões das áreas das quatro faces desgastadas.

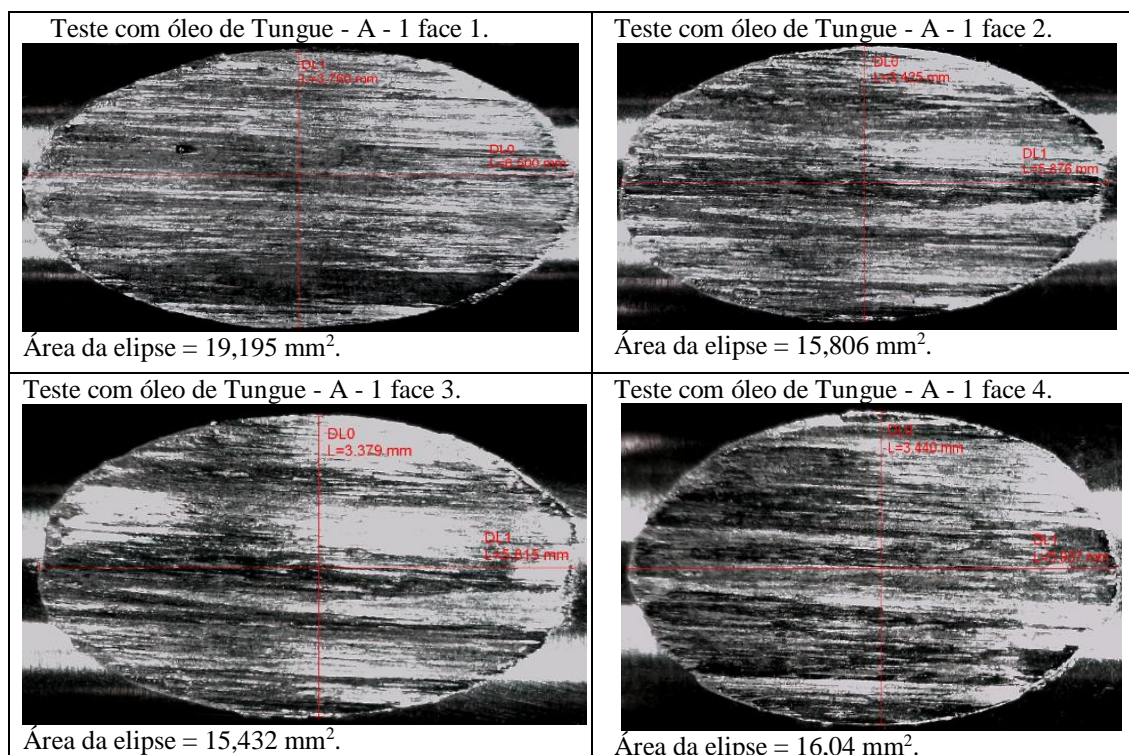


Figura A.7 - Imagens do pino desgastado, ensaios com óleo de Tungue: A - 1 pino 1.
Fonte: Autoria própria.

A Tabela A.9 mostra os resultados dos ensaios *Reichert Test* para as repetições realizadas com óleo de Tungue emulsificado para o pino A - 2.

Tabela A.9 - Ensaios realizados com Tungue A - 2: Pino 2.

Tipo de (Bio) Lubrificante	Amostra Pino 2	Peso Inicial (g)	Peso Final (g)	Temp. Inicial Flu.	Temp. Inicial C.p.	Temp. Final Flu.	Temp. Final C. p.	Perda de Massa (g)
Tungue A - 2	A2-Rep. 1	15,76	15,72	18,70	16,29	39,86	28,41	0,05
	A2-Rep. 2	15,72	15,70	23,58	17,11	30,94	23,72	0,02
	A2-Rep. 3	15,70	15,67	21,80	16,49	39,72	29,05	0,03
	A2-Rep. 4	15,67	15,64	25,94	18,66	46,07	33,90	0,03

Fonte: Autoria própria.

A Figura A.8 mostra imagens das faces desgastadas dos corpos de provas para os ensaios realizados com óleo de Tungue emulsificado para o pino 2, nas quais podem ser observadas as dimensões das áreas das quatro faces desgastadas.

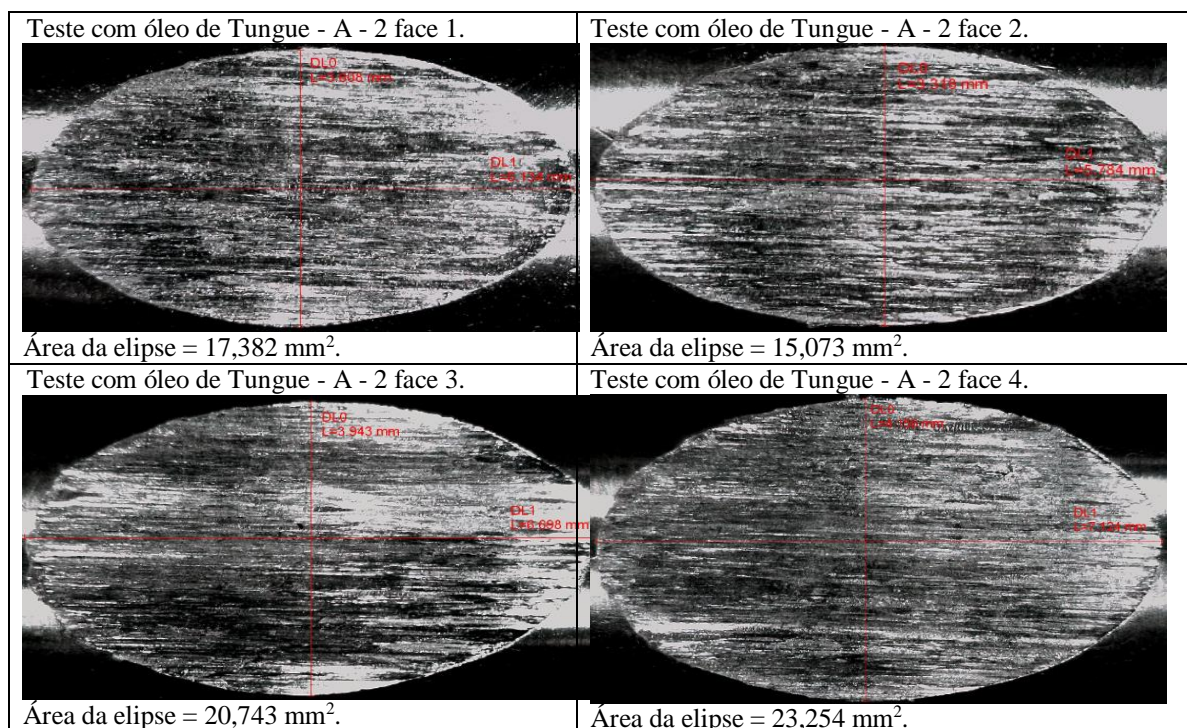


Figura A.8 - Imagens do pino desgastado, ensaios com óleo de Tungue: A - 2 pino 2.

Fonte: Autoria própria.

A Tabela A.10 mostra os resultados dos ensaios *Reichert Test* para as repetições realizadas com óleo de Pinhão manso emulsificado para o pino A - 1.

Tabela A. 10 - Ensaios realizados com Pinhão manso A - 1: Pino 1.

Tipo de (Bio) Lubrificante	Amostra Pino - 1	Peso Inicial (g)	Peso Final (g)	Temp. Inicial Flu.	Temp. Inicial C.p.	Temp. Final Flu.	Temp. Final C. p.	Perda de Massa (g)
Tungue A - 1	A1-Rep .1	15,76	15,73	18,80	17,08	27,19	21,36	0,03
	A1-Rep .2	15,73	15,69	22,88	17,56	30,44	22,94	0,04
	A1-Rep .3	15,69	15,64	25,02	19,85	39,60	30,31	0,04
	A1-Rep .4	15,64	15,62	30,40	20,98	37,05	27,67	0,03

Fonte: Autoria própria.

A Figura A.9 mostra imagens das faces desgastadas dos corpos de provas para os ensaios realizados com óleo de Pinhão manso emulsificado para o pino 1, nas quais podem ser observadas as dimensões das áreas das quatro faces desgastadas.

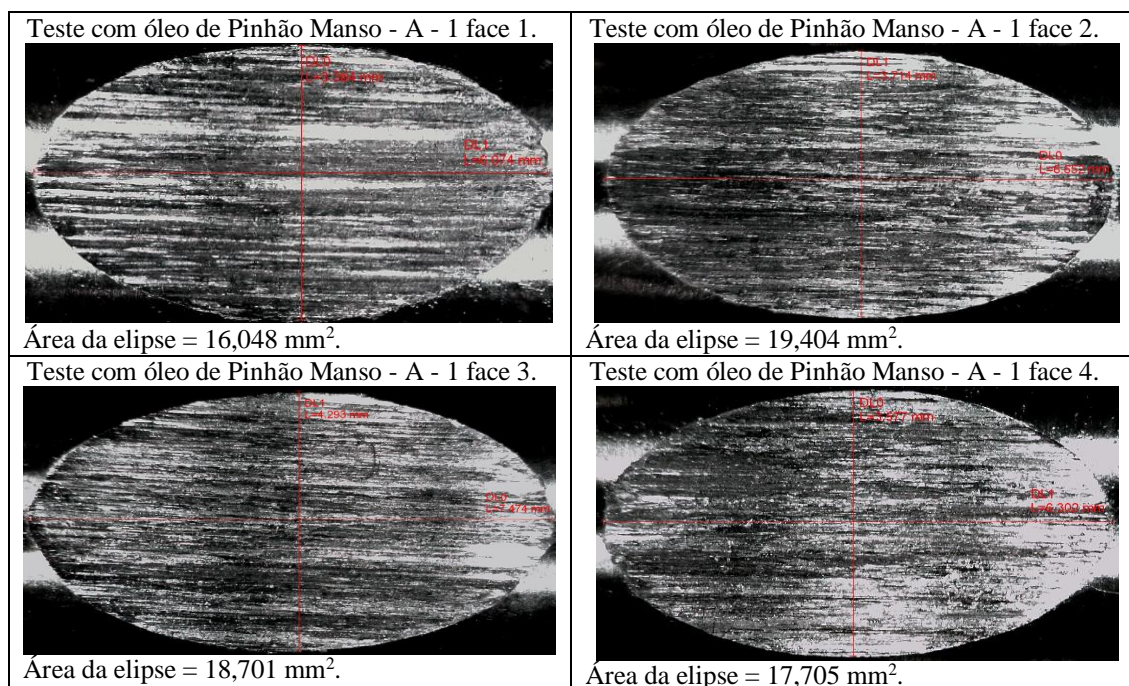


Figura A.9 - Imagens do pino desgastado, ensaios com óleo de Pinhão manso: A - 1 pino 1
Fonte: Autoria própria.

A Tabela A.11 mostra os resultados dos ensaios *Reichert Test* para as repetições realizadas com óleo de Pinhão manso emulsificado para o pino A - 2.

Tabela A. 11 - Ensaios realizados com Pinhão manso A - 2: Pino 2.

Tipo de (Bio) Lubrificante	Amostra Pino - 2	Peso Inicial (g)	Peso Final (g)	Temp. Inicial Flu.	Temp. Inicial C.p.	Temp. Final Flu.	Temp. Final C. p.	Perda de Massa (g)
Tungue A - 2	A2-Rep. 1	15,74	15,68	34,01	22,23	38,59	28,72	0,06
	A2-Rep. 2	15,68	15,66	30,63	21,16	39,68	29,82	0,02
	A2-Rep. 3	15,66	15,62	31,81	22,50	44,24	34,29	0,04
	A2-Rep. 4	15,62	15,58	30,12	22,19	44,77	32,39	0,04

Fonte: Autoria própria.

A Figura A. 10 mostra imagens das faces desgastadas dos corpos de provas para os ensaios realizados com óleo de Pinhão manso emulsificado para o pino 2, nas quais podem ser observadas as dimensões das áreas das quatro faces desgastadas.

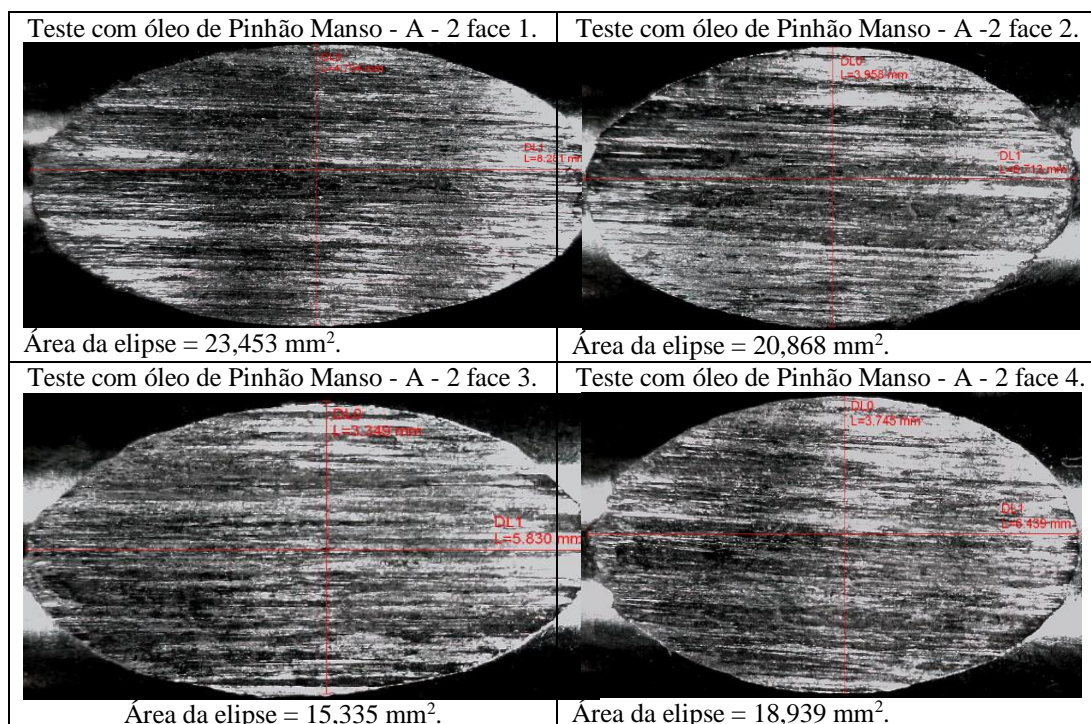


Figura A.10 - Imagens do pino desgastado, ensaios com óleo de Pinhão manso A - 2 pino 2.
Fonte: Autoria própria.

3) Resultados dos Ensaios de Usinagem

A Tabela A.12 mostra os números de intervalos de medição, valores de desgaste a cada intervalo e comprimento usinado para cada intervalo referente à aresta 1.

Tabela A.12 - Ensaios de usinagem com óleo de Pinhão Manso - Aresta 1.

Números de Intervalos	Desgaste(mm)	Comprimento Usinado(m)
1	0,176	0,72
1	0,181	0,72
1	0,187	0,72
2	0,190	1,44
2	0,195	1,44
2	0,198	1,44
3	0,221	2,16
3	0,226	2,16
3	0,237	2,16

Fonte: Autoria própria.

A Tabela A.13 apresenta as médias dos valores de desgaste de flanco para cada intervalo de medição e a média final para cada intervalo referente à aresta 1.

Tabela A.13 - Valores médios de desgaste de flanco (mm) - Aresta 1.

Intervalo - 1	Intervalo - 2	Intervalo - 3
0,176	0,190	0,221
0,181	0,195	0,226
0,187	0,198	0,237
Média = 0,181	Média = 0,194	Média = 0,228

Fonte: Autoria própria.

A Tabela A.14 mostra os números de intervalos, valores de desgaste a cada intervalo de medição e comprimento usinado para cada intervalo referente à aresta 2.

Tabela A.14 - Ensaios de usinagem com óleo de Pinhão manso - Aresta 2.

Números de Intervalos	Desgaste(mm)	Comprimento Usinado(m)
1	0,092	0,72
1	0,126	0,72
1	0,130	0,72
2	0,145	1,44
2	0,158	1,44
2	0,171	1,44
3	0,178	2,16
3	0,189	2,16
3	0,200	2,16
4	0,200	2,88
4	0,207	2,88
4	0,215	2,88

Fonte: Autoria própria.

A Tabela A.15 apresenta as médias dos valores de desgaste de flanco para cada intervalo, conforme estabelecido no planejamento experimental, para o qual foi constatado um desgaste de flanco máximo de $VB_{Bmáx} = 0,207$ mm. Pode-se observar que ao final do terceiro intervalo de medição, a média de desgaste já havia atingido o valor limite, porém com uma margem estreita de tolerância. Desta forma, optou-se pela execução do quarto intervalo, alcançando um comprimento de material usinado de 2,88 m para a aresta 2.

Tabela A.15 - Valores médios de desgaste de flanco (mm) - Aresta 2.

Intervalo - 1	Intervalo - 2	Intervalo - 3	Intervalo - 4
0,092	0,145	0,178	0,200
0,126	0,158	0,189	0,207
0,130	0,171	0,200	0,215
Média = 0,112	Média = 0,158	Média = 0,189	Média = 0,207

Fonte: Autoria própria.

A Tabela A.16 mostra os números de intervalos, valores de desgaste a cada intervalo de medição e comprimento usinado para cada intervalo, sendo necessário quatro intervalos, alcançando um comprimento de material usinado de 2,88 m para a aresta 3.

Tabela A.16 - Ensaios de usinagem com óleo de Pinhão manso - Aresta 3.

Números de Intervalos	Desgaste (mm)	Comprimento Usinado (m)
1	0,062	0,72
1	0,068	0,72
1	0,070	0,72
2	0,093	1,44
2	0,103	1,44
2	0,105	1,44
3	0,170	2,16
3	0,176	2,16
3	0,186	2,16
4	0,201	2,88
4	0,228	2,88
4	0,247	2,88

Fonte: Autoria própria.

A Tabela A.17 apresenta as médias dos valores de desgaste de flanco para cada intervalo de medição, conforme estabelecido no planejamento experimental, para o qual foi definido um desgaste de $VB_{Bmáx} = 0,225$ mm alcançando um comprimento de material usinado de 2,88 m para a aresta 3.

Tabela A.17 - Valores médios de desgaste de flanco (mm) - Aresta 3.

Intervalo - 1	Intervalo - 2	Intervalo - 3	Intervalo - 4
0,062	0,093	0,170	0,201
0,068	0,103	0,176	0,228
0,070	0,105	0,186	0,247
Média = 0,066	Média = 0,100	Média = 0,177	Média = 0,225

Fonte: Autoria própria.

4) Mecanismos de Desgaste

Análises EDX de composição nos pontos destacados conforme mostrado na Tabela A.18 apresentam a composição química nos pontos analisados para a ferramenta de corte de metal duro revestida, após a usinagem de 2,88 m de comprimento utilizando fluido de base vegetal de Pinhão manso emulsificado para aresta 1.

Tabela A.18 - Composição química em porcentagem (%) nos pontos analisados para aresta 1 - emulsão de Pinhão manso.

Spectro	C	N	O	Al	Si	Ti	Fe	Co	W	Total
1		34.46		15.70		49.84				100.00
2	4.16	7.27	39.18	22.88	1.31	46.28				100.00
3	10.73		39.18				22.58	2.45	57.79	100.00
4	13.23			0.59	2.63		82.64			100.00
5	11.79		4.58				10.07	1.88	71.68	100.00
6		39.18		18.67		42.14				
Max.	13.23	39.18	16.97	22.88	2.63	49.84	82.64	2.45	71.68	
Min.	4.16	7.27	4.58	0.59	1.31	42.14	10.07	1.88	57.79	

Fonte: Autoria própria.

Análises EDX de composição nos pontos destacados conforme mostrado na Tabela A.19 apresentam a composição química nos pontos analisados para a ferramenta de corte de metal duro na face de desgaste de flanco da ferramenta de corte revestida, após a usinagem de 2,88 m de comprimento utilizando fluido de base vegetal de pinhão manso emulsificado para aresta 3.

Tabela A.19 - Composição química em porcentagem (%) nos pontos analisados para aresta 3 - emulsão de Pinhão manso.

Spectro	C	N	O	Al	Si	Ti	Fe	Co	W	Total
1	10.70	26.00		29.14		34.16				100.00
2	48.41	7.17	4.90	17.05	0.27	21.51	0.67			100.00
3	16.72	33.13	4.44	23.75	0.18	21.77				100.00
4	23.63		26.39	0.31			9.31	2.80	37.56	100.00
5	13.07		3.71	1.14	1.86		71.61		7.59	100.00
6	16.85		5.69	0.80			15.58		61.07	100.00
7	3.84	38.38		14.07		43.71				100.00
8	16.88	10.70	3.56	30.20		3.35	0.96		61.35	100.00
9	14.97	29.09	16.50	11.15	0.96	26.92	0.42			100.00
Max.	48.41	38.38	26.39	29.14	1.86	43.71	71.61	2.80	61.35	
Min.	3.84	7.17	3.56	0.31	0.18	3.35	0.42	2.80	7.59	

Fonte: Autoria própria.

Análises EDX de composição nos pontos destacados conforme mostrado na Tabela A.20 apresentam a composição química nos pontos analisados para a ferramenta de corte de metal duro na face de desgaste de flanco da ferramenta de corte revestida, após a usinagem de 2,16 m de comprimento utilizando fluido de base vegetal de tungue emulsificado para aresta 1.

Tabela A.20 - Composição química em porcentagem (%) nos pontos analisados para aresta 1 - emulsão de Tungue.

Spectro	C	N	O	Al	Si	Ti	Fe	Co	CU	W	Total
1	40.20		12.96	0.34			21.17		0.00	25.33	100.00
2	34.12		9.95	0.27	1.81		37.79			15.66	100.00
3	43.67		9.78				1.82	0.54		44.18	100.00
4	21.55	20.88	14.75	10.81		31.08	0.93				100.00
5	34.75	15.89	22.04	8.54		18.48			0.31		100.00
6	6.58	12.62	33.27	15.51	4.54	23.62	3.04				100.00
Max.	43.67	20.88	33.27	15.51	4.54	31.08	37.79	0.54	0.31	44.18	
Min.	6.58	12.62	9.78	0.27	1.81	18.48	0.93	0.54	0.00	15.66	

Fonte: Autoria própria.

Análises EDX de composição nos pontos destacados conforme mostrado na Tabela A.21 apresentam a composição química nos pontos analisados para a ferramenta de corte de metal duro na face de desgaste de flanco da ferramenta de corte revestida, após a usinagem de 2,16 m de comprimento utilizando fluido de base vegetal de tungue emulsificado para aresta 3.

Tabela A.21 - Composição química em porcentagem (%) nos pontos analisados para aresta 3 - emulsão de Tungue.

Spectro	C	N	O	Al	Si	Ti	Fe	Co	W	Total
1	9,81	36,93	9.17	10.87		33.23				100.00
2	29,80		5.53	0.80			5.22	2.19	56,46	100.00
3	18,35			2.40	2,50		76.75			100.00
4		31,82		33.04		35.14				100.00
5	94,96		4.16	0.61		0.97				100.00
6	21,88	29,27	12.65	11.26		24.53				100.00
Max.	94.26	36.93	12.65	33.04	2.50	35.14		2.19	56.46	
Min.	9.81	29.27	4.16	0.61	2.50	0.97		2.19	56.46	

Fonte: Autoria própria.

5) Análise EDX da Superfície dos Corpos de Provas

Análises EDX de composição nos pontos destacados conforme mostrado na Tabela A.22 apresentam a composição química nos pontos analisados na superfície do corpo de provas usinado com ferramenta de corte de metal duro revestido, após a usinagem de 2,88 m de comprimento utilizando fluido de base vegetal de Pinhão manso emulsificado

Tabela A.22 - Composição química em porcentagem (%) nos pontos analisados – Pinhão manso.

Spectro	C	O	S	Al	Si	Ti	Fe	Mn	Total
1	35.36	1.53			1.19		61.36	0.35	100.00
2	21.71	1.64			1.57		74.44	0.37	100.00
3	48.60				0.88		50.12	0.28	100.00
4	50.75	23.91	0.24	1,09	0.96	19.97	2.98		100.00
5	60.46	0.60			0.56		38.08	0.21	100.00
6	83.92	3.66					12.42		100.00
Max.	83.92	23.91	0.24	1.09	1.57	19.97	74.44	0.37	
Min.	21.71	0.60	0.24	1.09	0.56	19.97	2.98	0.21	

Fonte: Autoria própria.

Análises EDX de composição nos pontos destacados conforme mostrado na Tabela A.23 apresentam a composição química nos pontos analisados na superfície do corpo de provas usinado com ferramenta de corte de metal duro revestido, após a usinagem de 2,16 m de comprimento utilizando fluido de base vegetal de tungue emulsificado.

Tabela A.23 - Composição química em porcentagem (%) nos pontos analisados - Tungue.

Spectro	C	O	Cu	Si	Ti	Fe	Total
1	70.52	2.27	0.42	1.45		64.90	100.00
2	9.82		0.71	1.89		93.23	100.00
3	103.16	0.81	0.47	1.41		56.97	100.00
4	102.41	4.91		0.15		2.27	100.00
5	54.97	6.91			19.97	1.62	100.00
6	52.63	4.72		0.25		4.01	100.00
7	50.85	4.36	0.70	1.92		74.86	100.00
Max.	83.92	23.91	0.9	1.57	19.97	74.44	
Min.	21.71	0.60	0.3	0.56	19.97	2.98	

Fonte: Autoria própria.

6) Rugosidade Superficial

A Tabela A.24 mostra os valores médios dos parâmetros de rugosidade R_a , R_q e R_z para todos os intervalos de medição utilizando fluido de Pinhão manso para a aresta 1, conforme foi estabelecido no planejamento experimental.

Tabela A.24 - Médias dos parâmetros de rugosidade (μm) - Aresta 1.

Intervalos	Parâmetro R_a (μm)	Parâmetro R_q (μm)	Parâmetro R_z (μm)
Int. - 1	0,43	0,65	3,60
Int. - 2	0,58	0,70	3,90
Int. - 3	0,94	1,24	6,40

Fonte: Autoria própria.

A Tabela A.25 mostra os valores médios dos parâmetros de rugosidade R_a , R_q e R_z para todos os intervalos de medição utilizando fluido de Tungue para a aresta 1, conforme foi estabelecido no planejamento experimental.

Tabela A.25 - Médias dos parâmetros de rugosidade (μm) - Aresta 1.

Intervalos	Parâmetro R_a (μm)	Parâmetro R_q (μm)	Parâmetro R_z (μm)
Int.- 1	0,34	0,52	0,86
Int. - 2	0,43	0,61	1,14
Int. - 3	2,33	3,88	5,95

Fonte: Autoria própria.

A Tabela A.26 mostra os valores médios dos parâmetros de rugosidade R_a , R_q e R_z para todos os intervalos de medição utilizando fluido de Pinhão manso para a aresta 2, conforme foi estabelecido no planejamento experimental.

Tabela A.26 - Médias dos parâmetros de rugosidade (μm) - Aresta 2.

Intervalos	Parâmetro R_a (μm)	Parâmetro R_q (μm)	Parâmetro R_z (μm)
Int.- 1	0,45	0,62	3,60
Int. - 2	0,43	0,58	3,71
Int. - 3	0,45	0,6	3,72
Int.- 4	0,79	0,98	5,13

Fonte: Autoria própria.

A Tabela A.27 mostra os valores médios dos parâmetros de rugosidade R_a , R_q e R_z para todos os intervalos de medição utilizando fluido de Tungue para a aresta 2, conforme foi estabelecido no planejamento experimental.

Tabela A.27- Médias dos parâmetros de rugosidade (μm) - Aresta 2.

Intervalos	Parâmetro R_a (μm)	Parâmetro R_q (μm)	Parâmetro R_z (μm)
Int.- 1	0,52	0,35	0,95
Int. - 2	0,71	0,46	1,26
Int. - 3	4,12	3,3	6,6

Fonte: Autoria própria.

A Tabela A.28 mostra os valores médios dos parâmetros de rugosidade R_a , R_q e R_z para todos os intervalos de medição utilizando fluido de Pinhão manso para a aresta 3, conforme foi estabelecido no planejamento experimental.

Tabela A.28 - Médias dos parâmetros de rugosidade (μm) - Aresta 3.

Intervalos	Parâmetro R_a (μm)	Parâmetro R_q (μm)	Parâmetro R_z (μm)
Int.- 1	0,27	0,33	1,77
Int. - 2	0,50	0,69	3,8
Int. - 3	0,51	0,7	4,18
Int.- 4	0,52	0,68	4,43

Fonte: Autoria própria.

A Tabela A.29 mostra os valores médios dos parâmetros de rugosidade R_a , R_q e R_z para todos os intervalos de medição utilizando fluido de Tungue para a aresta 3, conforme foi estabelecido no planejamento experimental.

Tabela A.29 - Médias dos parâmetros de rugosidade (μm) - Aresta 3.

Intervalos	Parâmetro R_a (μm)	Parâmetro R_q (μm)	Parâmetro R_z (μm)
Int.- 1	0,33	0,41	0,98
Int. - 2	0,44	0,58	1,31
Int. - 3	2,64	3,37	6,84

Fonte: Autoria própria.

7) Consumo de Potência

A Tabela A.30 Mostra os valores das médias e a dispersão dos valores da potência consumida em relação à média do consumo de potência para todos os intervalos de medição, utilizando fluido de Pinhão manso para a aresta 1, conforme foi estabelecido no planejamento experimental.

Tabela A.30 - Consumo de Potência (Wh) emulsão de Pinhão manso - Aresta 1.

Intervalo - 1	Intervalo - 2	Intervalo - 3
12,54	14,02	14,20
13,15	12,11	12,96
12,93	13,69	14,49
12,98	13,06	13,05
13,20	13,38	13,76
Média = 12,96	Média = 13,25	Média = 13,69

Fonte: Autoria própria.

A Tabela A.31 mostra os valores das médias e a dispersão dos valores da potência consumida em relação à média do consumo de potência para todos os intervalos de medição utilizando fluido de Tungue para a aresta 1, conforme foi estabelecido no planejamento experimental.

Tabela A.31 - Consumo de Potência (Wh) emulsão de Tungue - Aresta 1.

Intervalo - 1	Intervalo - 2	Intervalo - 3
14,96	15,23	16,07
14,12	14,12	14,62
15,05	15,84	17,75
12,98	14,53	14,82
14,67	14,76	13,34
Média = 14,19	Média = 14,91	Média = 15,32

Fonte: Autoria própria.

A Tabela A.32 Mostra os valores das médias e a dispersão dos valores da potência consumida em relação à média do consumo de potência para todos os intervalos de medição utilizando fluido de Pinhão manso para a aresta 2, conforme foi estabelecido no planejamento experimental.

Tabela A.32 - Consumo de Potência (Wh) emulsão de Pinhão manso - Aresta 2.

Intervalo - 1	Intervalo - 2	Intervalo - 3	Intervalo - 4
14,020	14,08	14,17	14,04
12,110	12,86	13,27	13,03
13,690	14,14	14,61	13,79
12,460	12,90	13,07	13,11
13,400	12,44	12,46	13,05
Média = 13,14	Média = 13,28	Média = 13,52	Média = 13,40

Fonte: Autoria própria.

A Tabela A.33 mostra os valores das médias e a dispersão dos valores da potência consumida em relação à média do consumo de potência para todos os intervalos de medição utilizando fluido de Tungue para a aresta 2, conforme foi estabelecido no planejamento experimental.

Tabela A.33 - Consumo de Potência (Wh) emulsão de Tungue - Aresta 2.

Intervalo - 1	Intervalo - 2	Intervalo - 3
14,32	13,78	15,31
14,17	15,08	15,95
12,93	12,07	14,45
15,21	15,85	15,66
13,69	13,90	15,08
Média = 14,06	Média = 14,14	Média = 15,29

Fonte: Autoria própria.

A Tabela A.34 mostra os valores das médias e a dispersão dos valores da potência consumida em relação à média do consumo de potência para todos os intervalos de medição utilizando fluido de Pinhão manso para a aresta 3, conforme foi estabelecido no planejamento experimental.

Tabela A.34 - Consumo de Potência (Wh) emulsão de Pinhão manso - Aresta 3.

Intervalo - 1	Intervalo - 2	Intervalo - 3	Intervalo - 4
13,12	13,87	14,19	14,20
12,23	13,07	13,26	12,96
13,57	13,94	14,59	14,49
12,05	12,32	13,04	13,05
12,13	13,33	12,58	13,76
Média = 12,62	Média = 13,31	Média = 13,53	Média = 13,69

Fonte: Autoria própria.

A Tabela A.35 mostra os valores das médias e a dispersão dos valores da potência consumida em relação à média do consumo de potência para todos os intervalos de medição utilizando fluido de Tungue para a aresta 3, conforme foi estabelecido no planejamento experimental.

Tabela A.35 - Consumo de Potência (Wh) emulsão de Tungue - Aresta 3.

Intervalo - 1	Intervalo - 2	Intervalo - 3
14,05	13,05	14,31
13,75	11,92	18,79
11,85	13,01	18,68
14,10	12,92	18,45
14,43	11,44	15,82
Média = 13,64	Média = 12,47	Média = 17,21

Fonte: Autoria própria.