UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Câmpus de Ilha Solteira

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ELIAS DO AMARAL NUNES

INVESTIGAÇÃO DA VIABILIDADE DE FLUIDOS OLUC COMO ALTERNATIVA AOS FLUIDOS DE CORTE CONVENCIONAIS POR MEIO DE ENSAIOS DE DESGASTE EM AÇO RÁPIDO

Ilha Solteira - SP
4 de julho de 2026

ELIAS DO AMARAL NUNES

INVESTIGAÇÃO DA VIABILIDADE DE FLUIDOS OLUC COMO ALTERNATIVA AOS FLUIDOS DE CORTE CONVENCIONAIS POR MEIO DE ENSAIOS DE DESGASTE EM AÇO RÁPIDO

Trabalho de graduação apresentado à Faculdade de Engenharia - UNESP - Campus de Ilha Solteira, como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Prof. Dr .Wyser José Yamakami
Orientador

Ilha solteira - SP
4 de julho de 2026

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

N973i

Nunes, Elias do Amaral.
Investigação da viabilidade de fluidos oluc como alternativa aos fluidos de corte convencionais por meio de ensaios de desgaste em aço rápido / Elias do Amaral Nunes. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2026
83 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira, 2026

Orientador: Wyser José Yamakami

Inclui bibliografia

1. Ensaio de desgaste. 2. Fluido de corte. 3. OLUC. 4. Aço rápido . 5. Tribologia . 6. Esfera rotativa .

Sandra Montibeller - CRB-8/060/2025

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE ENGENHARIA – CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
ATA DA DEFESA – TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Foi sugerido pela Comissão Examinadora a alteração do Título "Ensaio de Desgaste para Avaliação de Fluido de Corte" para:

TÍTULO: "Investigação da Viabilidade de fluidos OLUC como Alternativa aos Fluidos de Corte Convencionais por Meio de Ensaios de Degaste em Aço Rápido"

ALUNO: Elias do Amaral Nunes RA: 182053695
Orientador: Prof. Dr. Wyser José Yamakami

Aprovado (X) – Reprovado ( ) pela Comissão Examinadora
Nota obtida: 9,0
Comissão Examinadora:

gov.br Documento assinado digitalmente
WYSER JOSE YAMAKAMI
Data: 06/07/2026 10:29:47-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

_____
Prof. Dr. Wyser José Yamakami
UNESP – Faculdade de Engenharia – Ilha Solteira

gov.br Documento assinado digitalmente
VICENTE AFONSO VENTRELLA
Data: 06/07/2026 10:41:33-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

_____
Prof. Dr. Vicente Afonso Ventrella
UNESP – Faculdade de Engenharia – Ilha Solteira

gov.br Documento assinado digitalmente
JOSE GEDAEL FAGUNDES JUNIOR
Data: 06/07/2026 12:43:14-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

_____
Prof. Dr. José Gedael Fagundes Júnior
UNESP – Faculdade de Engenharia – Ilha Solteira

Elias Do Amaral Nunes
Assinado de forma digital por Elias Do Amaral Nunes
Dados: 2026.07.13 16:52:07 -04'00'

_____
Elias do Amaral Nunes

Ilha Solteira (SP), 25 de junho de 2026

RESUMO

Nos processos de usinagem o desgaste das ferramentas é um processo inevitável que leva à necessidade de substitui-las, a fim de evitar danos à qualidade peça usinada, contribuindo para o custo total deste processo. A aplicação de fluidos de corte visa minimizar este desgaste durante a usinagem permitindo maiores velocidades de corte e/ou vida da ferramenta. Alguns fluidos de corte são a base de óleos minerais, contribuindo para as grandes quantidades de lubrificantes empregados pelas industrias nos componentes mecânicos. A produção, distribuição e descarte adequado de óleos lubrificantes envolvem custos significativos, além do prejuízo ambiental, pois o petróleo é um recurso natural. Óleos lubrificantes usados ou contaminados (OLUC) apresentam desafios ambientais significativos devido ao seu longo tempo de decomposição e ao potencial de contaminar a água e o solo se descartados inadequadamente. Esta pesquisa avalia a viabilidade da reutilização do OLUC como fluido de corte na usinagem, a fim de reduzir custos deste processo e contribuir para um menor impacto ao meio ambiente. Três ensaios de desgaste com tribômetro de esfera rotativa, girando a velocidade angular constante, foram realizados aplicando-se, em cada ensaio, fluido de corte convencional, OLUC mineral e OLUC sintético por meio de gotejamento destes elementos na região de contato entre a esfera e um bit de aço rápido tomado como corpo de prova (CDP). Para cada ensaio o CDP foi analisado em um microscópio óptico para medir o diâmetro da calota esférica gerada pelo desgaste para percursos de deslizamento da esfera sobre o bit de 1000, 2000, 3000, 4000 e 5000 metros. As medidas dos diâmetros das calotas geradas revelaram um comportamento de desgaste semelhante entre os três fluidos. Para percurso de 1000 metros, as taxas de desgaste foram: $6,91 \times 10^{-7} mm^3/m$ para fluido de corte, $5,72 \times 10^{-7} mm^3/m$ para óleo mineral e $3,29 \times 10^{-7} mm^3/m$ para óleo sintético. Para distâncias de 1000 2000 3000 e 4000 metros o OLUC sintético e mineral mostraram taxas menores que o fluido de corte convencional. Para distância de 5000 m o fluido convencional mostrou uma taxa de desgaste menor ($4,44 \times 10^{-7} mm^3/m$), o óleo sintético teve uma taxa de desgaste maior ($5,08 \times 10^{-7} mm^3/m$) do que sua taxa inicial, e o óleo mineral apresentou a maior taxa de desgaste ($7,74 \times 10^{-7} mm^3/m$). Para processos de usinagem em que o atrito é a principal causa do desgaste, os óleos lubrificantes usados podem reduzir efetivamente o desgaste da ferramenta. No entanto, para usinagem de alta velocidade em que a temperatura é o principal fator, o fluido de corte convencional continua sendo a melhor opção. Verifica- se assim, o potencial de utilização do OLUC como uma alternativa sustentável em condições específicas de usinagem, contribuindo tanto para a economia deste processo, quanto para a proteção ambiental. A utilização do OLUC, como fluido de corte mostra-se viável para distâncias de ensaio de desgaste até 3000 metros, a partir disso, ocorrem fenômenos, os quais causam o aumento da taxa de desgaste superior aos ensaios de desgaste com a utilização do fluido de corte convencional.

Palavras-chave: OLUC. Reutilização. Desgaste. Aço Rápido. Usinagem. Fluido de corte.

ABSTRACT

In machining processes, tool wear is inevitable, necessitating tool replacement to avoid compromising the quality of the machined part and adding to the process's total cost. The application of cutting fluids aims to minimize this wear, enabling higher cutting speeds and/or extended tool life. Some cutting fluids are mineral oil-based, contributing to the vast quantities of lubricants used by industries for mechanical components. The production, distribution, and proper disposal of lubricating oils entail significant costs and environmental damage, given that petroleum is a natural resource. Used or contaminated lubricating oils (OLUC) pose significant environmental challenges due to their long decomposition times and potential to contaminate water and soil if disposed of improperly. This research evaluates the feasibility of reusing OLUC as a cutting fluid in machining to reduce process costs and minimize environmental impact. Three wear tests were conducted using a rotating-ball tribometer operating at a constant angular velocity; in each test, a conventional cutting fluid, mineral OLUC, and synthetic OLUC were applied via dripping at the contact point between the ball and a high-speed steel bit (the test specimen). Following each test, the specimen was examined under an optical microscope to measure the diameter of the wear scar (spherical cap) produced over sliding distances of 1,000, 2,000, 3,000, 4,000, and 5,000 meters. Measurements of the resulting wear scar diameters revealed similar wear behavior across the three fluids. For a 1,000-meter run, the wear rates were: 6.91×10^{-7} mm³/m for cutting fluid, 5.72×10^{-7} mm³/m for mineral oil, and 3.29×10^{-7} mm³/m for synthetic oil. For distances of 1,000, 2,000, 3,000, and 4,000 meters, the synthetic and mineral OLUCs showed lower rates than the conventional cutting fluid. At a distance of 5,000 m, the conventional fluid showed a lower wear rate (4.44×10^{-7} mm³/m), the synthetic oil had a higher wear rate (5.08×10^{-7} mm³/m) than its initial rate, and the mineral oil exhibited the highest wear rate (7.74×10^{-7} mm³/m). For machining processes where friction is the primary cause of wear, used lubricating oils can effectively reduce tool wear. However, for high-speed machining where temperature is the main factor, conventional cutting fluid remains the best option. Thus, the potential for using OLUC as a sustainable alternative under specific machining conditions is evident, contributing to both the process's economics and environmental protection. The use of OLUC as a cutting fluid proves viable for wear test distances of up to 3,000 meters; beyond this point, phenomena occur that cause the wear rate to rise above that observed in tests using conventional cutting fluid.

keywords: OLUC, Reuse, Wear, High-Speed Steel, Machining, Cutting fluid.

Lista de Figuras

Lista de Figuras

1 Fluxograma da utilização do OLUC 13
2 Consumo de óleo lubrificante no mundo 2002-2011 18
3 Perfil de Rugosidade R_a 24
4 Modelos de interação entre um agente corrosivo e uma superfície desgastada. 30
5 Formas de remoção de material por desgaste abrasivo 31
6 Desgaste abrasivo a) Por riscamento b) Por rolamento 31
7 Desgaste de Cratera 33
8 Desgaste de Flanco 33
9 Aparelho de ensaio de desgaste 37
10 Desgaste Abrasivo a partir de grandezas geométricas 38
11 Dureza Vickers e microdureza dos aços utilizados 40
12 Volume Perdido em Função da Distância 41
13 Pontos de dissipação da temperatura de flash 43
14 Bit de Aço WKE 42 51
15 Especificação do fluido de corte 53
16 Filtro Quantitativo 54
17 Esfera AISI 52100 54
18 Equipamento de ensaio de desgaste 55
19 Viscosímetro Saybolt 56
20 Estereomicroscópio 57
21 Rugosímetro 58
22 Equipamento de dosagem de fluidos 58
23 Concentração Fluido de corte 59
24 Carga de Aplicação 60
25 Fixação da Esfera e do Bit de Aço 61
26 Display de Parâmetros 62
27 Desgaste para distâncias de 1000, 2000, 3000, 4000 e 5000 metros aplicando óleo mineral 65
28 Desgaste para distâncias de 1000, 2000, 3000, 4000 e 5000 metros aplicando óleo sintético 67
29 Desgaste para distâncias de 1000, 2000, 3000, 4000 e 5000 metros aplicando fluido de corte 68
30 Alteração da Coloração do Bit Ferramenta Após Ensaios Com Óleo Lubrificante 69
31 Volume Perdido em Função da Distância 70
32 Taxa de desgaste x Distância 71

Lista de Tabelas

Lista de Tabelas

1 Classificação de Óleos Básicos 13
2 Características de Óleos Parafínicos e Naftênicos 14
3 Parâmetros de rugosidade superficial inicial das amostras. 25
4 Relação entre Quilometragem e Viscosidade de Óleos Lubrificantes . . 42
5 Especificação e composição química do aço WKE 42. 52
6 Viscosidade dos Óleos e Fluido de Corte 63
7 Características Físico-Químicas do Óleo Mineral SAE 20W50 novo . . . 63
8 Características Físico-Químicas do Óleo Sintético SAE 5W30 novo . . . 64
9 Valor Médio, Desvio Padrão e Variação 64
10 Distância Percorrida e Diâmetro do Desgaste: Óleo Mineral 66
11 Distância Percorrida e Diâmetro do Desgaste: Óleo Sintético 67
12 Distância Percorrida e Diâmetro do Desgaste: Fluido de Corte 69
13 Volume de Cratera 70
14 Taxa de desgaste para cada fluido 71

LISTA DE SIGLAS

AES	Espectrometria de Elétrons Auger
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
API	American Petroleum Institute
CDP	Corpo de Prova
CFDG	Retificação Tangencial Profunda a Seco
CMMD	Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento
CNC	Controle Numérico Computadorizado
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
EP	Extrema Pressão
GPM	Grupo de Monitoramento Permanente
HSM	Usinagem em Alta Velocidade (High Speed Machining)
IV	Índice de Viscosidade
MQL	Mínima Quantidade de Lubrificante
OLA	Óleo Lubrificante Acabado
OLB	Óleo Lubrificante Básico
OLR	Óleo Lubrificante Rerrefinado
OLUC	Óleo Lubrificante Usado ou Contaminado
PAO	Polialfaolefinas
TRVO	Óleo Vegetal Reciclado Tratado
UCLO	Used or Contaminated Lubricating Oils

SUMÁRIO

Conteúdo

1 INTRODUÇÃO 10
1.1 Objetivo 11
1.1.1 Objetivos Específicos 11

2 REVISÃO DA LITERATURA 12
2.1 Óleos lubrificantes 12
2.1.1 Óleo Mineral 14
2.1.2 Óleo Sintético 14
2.1.3 Índice de Acidez e Índice de basicidade 15
2.1.4 Corrosividade 16
2.1.5 Aditivos para Lubrificantes 16
2.1.6 Definições Sobre o Manejo do Óleo Lubrificante 17
2.1.7 Rerrefino e Reutilização do OLUC 19
2.1.8 Controle de Qualidade 21
2.1.9 Desenvolvimento Sustentável 21
2.2 Conceitos Básicos 22
2.2.1 Viscosidade 22
2.2.2 Rugosidade 23
2.2.3 Índice de viscosidade (IV) 26
2.3 Desgaste 28
2.3.1 Desgaste Adesivo 28
2.3.2 Desgaste Corrosivo 29
2.3.3 Desgaste Abrasivo 30
2.3.4 Mecanismos de Desgaste 31
2.3.5 Abrasão Mecânica 32
2.3.6 Aderência 32
2.3.7 Difusão 32
2.3.8 Oxidação 32
2.3.9 Desgaste de Cratera 33
2.3.10 Desgaste de Flanco 33
2.3.11 Desgaste de Entalhe 34
2.3.12 Considerações sobre os Mecanismos de desgaste 34
2.3.13 Desgaste Dos Aços Rápidos 34
2.3.14 Tribologia 36
2.3.15 Importância do conhecimento sobre tribologia 36
2.3.16 Desgaste Micro-Abrasivo Por Esfera Rotativa 37
2.3.17 Tribômetro: Esfera Rotativa 37
2.3.18 Tipos De Ensaios de Desgaste Abrasivo 38
2.3.19 Taxa de Desgaste Gerada 38
2.3.20 Ensaios Relacionados 39
2.4 Fluido de corte 44
2.4.1 Fluido de Corte Como Refrigerante 45
2.4.2 Fluido de Corte Como Lubrificante 46
2.4.3 Classificação Dos Fluidos de Corte 46

2.4.4 Seleção do Fluido de Corte 49
2.4.5 Fluido de Corte e o Meio Ambiente 49

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL 51
3.1 Materiais 51
3.1.1 Metal base, óleos lubrificantes e fluido de corte 51
3.1.2 Esfera AISI 52100 54
3.2 Equipamentos 54
3.2.1 Máquina de ensaio de desgaste 54
3.2.2 Viscosímetro 55
3.2.3 Estereomicroscópio 56
3.2.4 Rugosímetro 57
3.2.5 Bomba Dosadora 58
3.3 Métodos 58
3.3.1 Preparação dos óleos e fluido de corte 58
3.3.2 Preparação da Esfera AISI 52100 59
3.3.3 Preparação do Bit de Aço 59
3.3.4 Preparação da Carga Aplicada 59
3.3.5 Preparação do Equipamento de Ensaio de Desgaste 60
3.3.6 Preparação dos Parâmetros de Ensaio 61

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 63
4.1 Viscosidade 63
4.2 Rugosidade da Esfera 64
4.3 Ensaios de Desgaste 64
4.3.1 Ensaio de Desgaste: Óleo Mineral 64
4.3.2 Ensaio de Desgaste: Óleo Sintético 66
4.3.3 Ensaio de Desgaste: Fluido de Corte 68
4.4 Bit Ferramenta Após a Realização dos Ensaios 69
4.5 Volume da Cratera 70
4.6 Taxa de Desgaste 71

5 CONCLUSÕES 75

6 Sugestões de Trabalhos Futuros e Melhorias 76

APÊNDICE A - TABELA DE MEDIDAS DE RUGOSIDADE 82

1 INTRODUÇÃO

No âmbito de mercado, qualquer mudança que ocorra, que acarreta em menores gastos, ganho de tempo e, ao mesmo tempo atenue o impacto ambiental, é sempre bem vinda. Seja diminuindo o tempo de produção, ou gastando menos com matérias-primas, ou até mesmo diminuindo os custos com transportes de mercadorias que poderiam ser evitados, tudo isso pode gerar redução de custos para uma empresa, promovendo, assim, uma melhor participação de mercado.

Tratando-se de óleos lubrificantes, o qual é produzido a partir de derivações do petróleo, há todo um processo de fabricação e transporte envolvendo a sua produção e distribuição, além disso, seu descarte não pode ser feito de qualquer forma, é necessário que haja uma devolução responsável. Pensando nisso, alternativas que aumentem a vida útil destes óleos são de grande importância, devido à seu custo econômico e ambiental, visando isso, o estudo sobre a possibilidade de dar uma segunda vida à óleos lubrificantes, reutilizando-os como fluido de corte é algo que merece atenção. A substituição de fluidos de corte por outros fluidos que desempenhem o mesmo papel, ou ao menos garantam algumas propriedades durante a usinagem, são uma boa alternativa para diminuir o impacto ambiental gerado pelos fluidos de corte, e também diminuir planilhas de custos com transportes e tratamentos de óleos lubrificantes usados.

Na natureza há a reciclagem dos materiais, havendo uma ordem e um controle natural sobre o que é produzido e o que é decomposto. Entretanto, no ramo industrial, não é tão fácil assim de ocorrer a decomposição dos materiais produzidos, como por exemplo, materiais derivados do petróleo, que possuem um tempo de vida muito alto, em comparação aos materiais não industrializados. De acordo com Paulo Finotti (2000), ex conselheiro do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), cerca de 1 litro de óleo lubrificante usado, descartado de forma incorreta, é capaz de poluir 1 milhão de litros de água e demorar aproximadamente 300 anos para se degradar.

A respeito do OLUC, tem-se várias normas, regulamentos e resoluções para garantir o manejo adequado durante sua utilização e seu tratamento, como é o caso da Resolução CONAMA n°362/2005, o qual criou o Grupo de Monitoramento Permanente (GPM), no qual dita diretrizes sobre a utilização e destinação correta para o OLUC, na natureza. O grupo é conduzido pelo Ministério do Meio Ambiente, juntamente com grupos-chave, para a indústria do petróleo, os quais tratam de direitos e obrigações dos produtores, revendedores, coletores e refinadores de OLUC. E mesmo com a existência de normas/diretrizes e a fiscalização desses setores, ainda assim, há a necessidade de aprimorar ainda mais, o manejo, tratamento e a reutilização dos óleos usados, aqui no Brasil (PEREIRA, 2017).

Dados da Agencia Nacional do Petróleo (ANP), indicam que, em 2019, o Brasil comercializou 1 bilhão e 200 milhões de litros de óleo lubrificante, e desse montante, apenas 454 milhões de litros foram coletados para re-refino, oque representa, aproximadamente 40% do valor total, comercializado, indicando que, mais de 50% do óleo lubrificante comercializado, não retornou para seu tratamento (CONAMA, 2020).

É importante compreender que a reutilização ou o re-refino do OLUC tem impacto direto na natureza, em relação ao fator sustentabilidade, onde, um material usado, pode ser reutilizado várias vezes, antes de passar por um descarte final, possibilitando seu retorno ao ciclo produtivo, e reduzindo, assim, a quantidade de resíduos gerados e a necessidade de matéria-prima para a produção do mesmo. Neste tema, o reuso e a reutilização, seja por meio do re-refino ou da reutilização do OLUC em outras cadeias produtivas, permitem a redução do desperdício .

O re-refino compreende-se como uma descontaminação do OLUC, que recupera sua matéria-prima, permitindo que se possa reutiliza-lo. Sua importância vai além da redução de resíduos, como também garante a destinação correta de um resíduo potencialmente contaminante para o meio ambiente. Com esse processo, tem-se a purificação do OLUC, tornando-o, óleo lubrificante básico, novamente, em uma proporção que vária de 75-80% de aproveitamento(PEREIRA, 2017).

Estando ciente de tais informações, é interessante encontrar formas de reutilização de óleos lubrificantes, de modo a aumentar sua vida útil na indústria, contribuindo dessa forma, para uma melhor relação indústria-meio ambiente, e consequentemente, diminuir gastos na obtenção de matérias-primas.

1.1 Objetivo

Para esse trabalho, um bit de aço ferramenta, foi submetido ao desgaste, por uma esfera rotativa, enquanto estava sendo lubrificado por Óleo Lubrificante Usado ou Contaminado (OLUC). Essa pesquisa tem o intuito de esclarecer como o óleo atua para a redução do desgaste da ferramenta em processos de usinagem, e tem como objetivo avaliar a viabilidade da aplicação do Oluc, como fluido de corte, na usinagem em substituição ao fluido convencional.

1.1.1 Objetivos Específicos

- Fazer uma análise comparativa, entre os desgastes gerados, com a utilização do OLUC, e fluido de corte convencional, sob as mesmas condições de teste.
- Observar as taxas de desgastes obtidas, variando as distâncias percorridas, nos testes, de modo a visualizar graficamente, o comportamento de cada um dos fluidos utilizados, para as mesmas distâncias aplicadas.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo apresenta o embasamento teórico necessário para a compreensão deste estudo, fundamentando-se em uma revisão de literatura que abrange artigos científicos, obras clássicas e documentos técnicos pertinentes ao tema.

2.1 Óleos lubrificantes

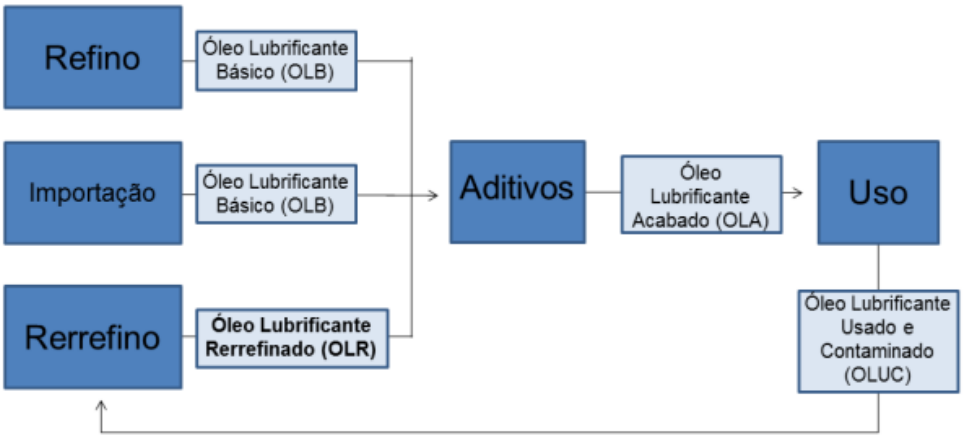
Os óleos lubrificantes automotivos (OLA) são indispensáveis para garantir desempenho e extensão da vida útil de motores veiculares, sendo essencial para o bom funcionamento dos mesmos, garantindo a redução do atrito, e a dissipação de calor, promovendo assim, uma performance melhor e segura, com um menor desgaste dos componentes mecânicos. Segundo (CARDOSO et al., 2022), o óleo lubrificante é utilizado em motores, como os de embarcações, maquinários e veiculares, entretanto, sua utilização é perigosa, pois gera, como resíduo, o OLUC (Óleo Lubrificante Usado ou Contaminado). Aqui no Brasil, atualmente, os óleos lubrificantes precisam atender às especificações dirigidas pela Agencia Nacional do Petróleo, Gás natural e Bio combustíveis (ANP), o qual define os óleos lubrificantes como substâncias que operam entre superfícies, gerando uma camada protetora que atenua o desgaste dos componentes, através de seus óleos base e aditivos, que são adicionados.

Os óleos lubrificantes são classificados a partir da origem de seu óleo base, e podem ser denominados de óleos graxos, quando seu óleo base é extraído de animais ou vegetais; óleos minerais, os quais possuem óleos extraídos do petróleo; óleos sintéticos, os quais são produzidos em laboratório e possuem como base, óleos sintéticos, e por fim, óleos compostos, os quais possuem uma mistura de bases diferentes. Contudo, o óleo mineral é, ainda hoje, o lubrificante mais utilizado pela indústria. O Conselho Nacional do Meio Ambiente, promoveu as seguintes denominações, em relação aos óleos lubrificantes:

- **Óleo Lubrificante Básico:** Constituinte principal dos óleos lubrificantes acabados, que atendem as regulamentações exigentes.
- **Óleo Lubrificante Acabado:** Produto do óleo lubrificante básico, os quais podem receber a adição de aditivos, que correspondam às exigências de necessidades para sua utilização.

Quando o óleo acabado atinge o final de sua vida útil, ele perde suas características, através da contaminação e oxidação de seus aditivos, fazendo com que se perca sua utilidade como lubrificante. Os óleos lubrificantes não são biodegradáveis e podem permanecer por vários anos, tornando-se um perigo para o meio ambiente e para a vida humana, caso não seja descartado corretamente. Na Figura 1 seguinte, tem-se o fluxograma, ilustrando, o ciclo de vida do OLUC, o seu refino e retorno para o mercado.

Figura 1: Fluxograma da utilização do OLUC



Fonte: (UZÊDA, 2014)

O Óleo Lubrificante Básico (OLB) não é obtido através de uma única maneira, mas sim, três. Conforme (UZÊDA, 2014), o OLB pode ser obtido por meio do refino do petróleo, importação ou, através de sua reciclagem (rerrefino). A partir do óleo lubrificante básico, adiciona-se aditivos, para que o mesmo possa adquirir as características de lubrificação, exigidas pela indústria, tornando-se Óleo Lubrificante Acabado (OLA). O OLA representa o produto final, o qual pode ser utilizado em máquinas, motores e peças, para efeitos de redução do atrito e bom funcionamento dos componentes mecânicos. Após sua utilização, o OLA perde suas características originais, por meio de contaminação e oxidação de seus aditivos, tornando-se Óleo Lubrificante Usado ou Contaminado (OLUC). Por fim, tem-se uma outra forma de obtenção do OLB, por meio do processo de rerrefino, onde o OLUC passa por uma reconstituição de suas características básicas, tornando-se OLB, novamente.

De acordo com o Instituto Americado de Petróleo, o OLB é classificado pelo seu teor de enxofre, saturação de ácidos e sua viscosidade, conforme esclarece a Tabela 1.

Tabela 1: Classificação de Óleos Básicos

Grupo	**% de Enxofre**	**% de Saturação**	**Viscosidade**
I	> 0.03	< 90	$80 - 119$
II	≤ 0.03	≥ 90	$80 - 119$
III	≤ 0.03	≥ 90	≥ 120

Fonte: Autor Próprio

A adição de aditivos ao OLB, pode garantir características adicionais, ou até mesmo, eliminar alguma propriedade indesejadas, por meio da adição desses compostos químicos. A pesquisa envolvendo aditivos para óleos lubrificantes, continua, para que cada vez mais, atingirem propriedades que mais se ajustam as necessidades atuais. Os aditivos podem conter antioxidantes, para aumentar a vida útil do óleo, retardando sua oxidação; detergentes, os quais permitem a separação e retirada de contaminantes

provenientes da combustão; anticorrosivos, que permitem a neutralização dos ácidos formados, evitando a corrosão das partes mecânicas em contato; e melhoradores de índices de viscosidade, os quais garantem uma melhor performance do óleo, permitindo que sua viscosidade varie menos, com as mudanças de temperaturas envolvidas.

2.1.1 Óleo Mineral

Os óleos de base mineral, são aqueles produzidos a partir do refino do petróleo e podem ser classificados como: parafínicos e naftênicos, os quais dependem de seus hidrocarbonetos. Através da tabela 2, a seguir, é possível ver as diferenças entre as classificações do óleo básico mineral.

Tabela 2: Características de Óleos Parafínicos e Naftênicos

Característica	**Parafínicos**	**Naftênicos**
Índice de Viscosidade (IV)	Alto	Baixo
Ponto de fluidez	Alto	Baixo
Resistência à oxidação	Grande	Pequena
Volatilidade	Baixa	Alta
Oleosidade	Pequena	Grande
Resíduo de carbono	Grande	Pequeno
Solvência	Baixa	Alta
Emulsibilidade	Pequena	Grande
Carbono naftênico, % típico	20	40

Fonte: (SANTOS, 2019)

Segundo (SANTOS, 2019), os óleos básicos parafínicos são os mais produzidos, devido à sua utilização na lubrificação automotiva e industrial, como em motores, transmissões e sistemas hidráulicos. Já os óleos básicos naftênicos, por apresentarem baixo índice de viscosidade e fluides, são utilizados em outras aplicações, envolvendo temperaturas mais baixas, como formulação de graxas, fluidos de amortecedores e isolantes elétricos.

Os óleos minerais são constituídos de uma mistura de hidrocarbonetos, através do refino do petróleo, moléculas de tamanhos diferentes e composição química, constituída por nitrogênio, enxofre e metais, de modo que a remoção de todos os elementos indesejados, é impossível, até o momento. Em função da impossibilidade da remoção desses compostos, os lubrificantes de base sintética estão ganhando força no mercado, por possuírem uma base mais controlada e livre de impurezas. A partir de estudos, através de termo gravimetria para o óleo mineral, concluiu-se que o óleo mineral apresentou uma estabilidade térmica inferior à do óleo mineral virgem, pela perda de massa (AZEVEDO; CARVALHO; FONSECA, 2005b).

2.1.2 Óleo Sintético

Os óleos sintéticos, diferentemente dos óleos minerais, são preparados através de sínteses químicas, onde, tanto a base, quanto o produto final possuem composições

mais definidas. Esse tipo de óleo possui maior estabilidade de suas propriedades, como sua variação de viscosidade, em função das temperaturas de aplicação, como também uma maior vida útil devido à um maior controle sobre sua oxidação. Devido à essa superioridade de propriedades, são agregados, a esse tipo de óleo, custos mais elevados (DUQUE, 2012). Alguns tipos de óleos sintéticos mais comuns, são:

- **Polialfaolefinas (PAO):** São hidrocarbonetos, os quais possuem boa estabilidade térmica e oxidativa, alto ponto de fulgor e alto índice de viscosidade (IV). Devido à essas características, são comumente aplicados no ramo automobilístico, como em óleos de motor.
- **Ésteres:** Diferentemente dos Polialfaolefinas (PAO), os Ésteres são o produto da reação entre um ácido carboxílico e um álcool, por meio de catalisadores ácidos ou básicos. Os diésteres são bastante utilizados, pois atuam, juntamente, com os Polialfaolefinas (PAO), como agentes de aumento de índice de viscosidade. Apresentam alto ponto de fulgor, e baixa volatilidade, por isso são utilizados em aplicações bastante especificas, no mercado industrial, como óleos hidráulicos e compressores, e também na área aeronáutica.

A utilização do óleo sintético vem aumentando devido à sua base possuir menos compostos indesejados, especialmente na indústria aeronáutica, na utilização de motores mais modernos. Com estudos surgindo com frequência sobre o assunto, o óleo sintético, hoje, é capaz de se manterem a elevadas temperaturas, por tempos, relativamente longos, em comparação aos óleos minerais, sem se decomporem. Em estudos realizados, por meio de ensaios termo gravimétricos, foi observado que os óleos sintéticos apresentavam uma decomposição térmica menor que a apresentada pelo óleo mineral, apresentando uma decomposição mais uniforme, mostrando que o óleo sintético apresenta uma melhor estabilidade térmica, atribuída à sua estrutura molecular controlada e isenta de contaminantes.(AZEVEDO; CARVALHO; FONSECA, 2005b).

2.1.3 Índice de Acidez e Índice de basicidade

Os derivados do petróleo, sendo novos ou usados, podem conter em sua composição, componentes ácidos ou básicos, provindos dos próprios aditivos ou a partir de sua própria degradação, durante o uso, com o advento de sua oxidação. O índice de acidez ou o número de basicidade, representa a concentração de ácidos ou bases, presentes no óleo, e são utilizados como parâmetro de qualidade dos óleos lubrificantes, e sua oxidação, durante o uso, funcionando como um indicador de qualidade para formulação de óleos lubrificantes. Os produtos da oxidação do óleo, corroboram para o número de acidez, onde tais ácidos orgânicos influenciam em propriedades corrosivas, entretanto, não existe, ainda, uma relação entre o número de acidez e o potencial corrosivo dos óleos, sobre os componentes metálicos. Mesmo assim, um alto índice de acidez indica que contaminantes ou derivados de oxidações podem estar presentes nos óleos básicos, onde seria necessário realizar processos de neutralização ou rerrefino, para conseguir adequá-lo. Um alto índice de acidez, indica que o óleo está oxidado ou contaminado, podendo causar a corrosão dos componentes metálicos (ASTM International, 2017).

Quando se utiliza óleo lubrificante, nos motores de combustão, a queima produz ácidos orgânicos, que ao acumular, promovem a degradação do óleo lubrificante.

Portanto, sabendo desse fato, é interessante que tais lubrificantes, tenham em sua formulação, neutralizantes, para combater esses ácidos. A capacidade e neutralização, desses ácidos, é medida através do índice de basicidade. O índice de basicidade representa a quantidade de componentes básicos capazes e neutralizar os ácidos formados na combustão, onde, quanto maior for o índice de basicidade, maior será o tempo em que se conseguirá neutralizar os ácidos produzidos, antes de ser necessária a substituição do óleo (BELMIRO; CARRETEIRO, 2006).

2.1.4 Corrosividade

Alguns compostos, presentes nos óleos básicos, como o enxofre, podem causar uma ação corrosiva em metais, principalmente, em ligas de cobre. Segundo (ASTM International, 2017), a corrosividade não está ligada, obrigatoriamente, ao teor de enxofre total, a corrosão pode depender das formas químicas dos compostos de enxofre, como H_2S e S^o, os quais são potencialmente corrosivos.

O ensaio de corrosividade, mais comum, é através de uma lâmina de cobre, exposta sob a ação de um óleo, durante um determinado período de tempo, o qual é comumente utilizado o prazo de 3 horas, sob temperaturas próximas de 100℃. No final do ensaio, observa-se que a lâmina sofre alterações em sua coloração, a qual é comparada com sua versão, anterior ao teste.

O teor de enxofre, presente nos óleos, depende da origem do petróleo e de seu processo de refino, o qual tem sido empregado, nos últimos tempos, como um indicador, de qualidade, para os óleos. Sua presença, nos óleos básicos, vem desde a etapa de petróleo bruto, entretanto, o processo de hidrotratamento, o qual submete o óleo básico à um processo de alta pressão e temperatura, por meio de gás hidrogênio, é frequentemente utilizado, com o intuito de reduzir o teor de enxofre, presente, pois sua presença, em determinadas formulações, pode acarretar em processos acentuados de corrosão (BELMIRO; CARRETEIRO, 2006).

2.1.5 Aditivos para Lubrificantes

Um óleo lubrificante acado (OLA) não é formulado, apenas, de óleo lubrificante básico (OLB), mas também, de um conjunto de aditivos, o qual é utilizado de acordo com sua finalidade e grau de qualidade do óleo base. A concentração de aditivos, presentes nos OLB, pode corresponder, em até 30%, da formulação total do OLA, onde um óleo básico, de menor qualidade, necessita de uma concentração maior de aditivos, para sua formulação final, e em outras ocasiões, existem aplicações, onde há a necessidade de uma aditivação de maior qualidade, como por exemplo, os óleos lubrificantes automotivos, os quais demandam de uma aditivação superior, para garantir um bom desempenho dos componentes mecânicos, por mais tempo.

Há várias classificações de aditivos, com o objetivo de melhorar a qualidade do óleo lubrificante, de várias maneiras, como por exemplo, os **agentes estabilizantes** e controladores de depósito. Essa classe atua na redução da formação de depósitos. Nesse grupo existem os **antioxidantes**, os quais regulam a decomposição oxidativa dos óleos e aditivos, e tem, também, os **detergentes**, os quais bloqueiam o ataque dos ácidos produzidos por meio da combustão e oxidação, mantendo as superfícies metálicas limpas, protegidas contra depósitos.

Além dos agentes estabilizantes, há também, os **agentes formadores de filme**. Esse grupo é responsável por realizar uma boa lubrificação e facilitar o movimento

de deslizamento entre superfícies metálicas. Essa função vem do óleo básico, o qual pode ser melhorada, através da utilização de óleos com alta viscosidade. Embora os óleos consigam proporcionar uma boa capacidade lubrificante, eles podem não atuar na maneira desejada, em todas as temperaturas de uso, impedindo a formação de um filme adequado, e proporcionar desgaste. Para essa situação, existem os **agentes antidesgaste**, que criam finas camadas de óleo entre as superfícies, formando um filme, que protege contra os efeitos do desgaste do material. Já a classe **modificadores de fricção**, atenuam o coeficiente de atrito, aumentando o desempenho do combustível e reduzindo o desgaste. Por fim, tem-se os **agentes inibidores de corrosão**, os quais bloqueiam a corrosão e a oxidação dos componentes metálicos, que estão sob o óleo lubrificante.

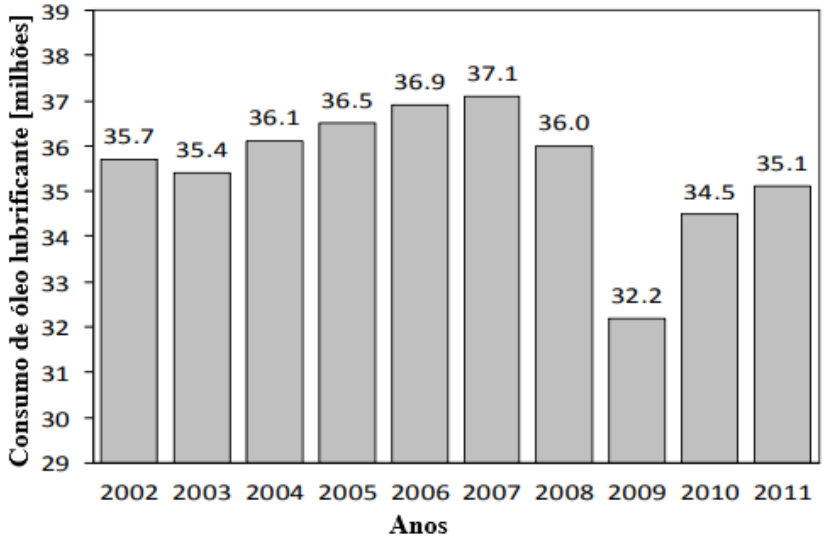
2.1.6 Definições Sobre o Manejo do Óleo Lubrificante

O óleo lubrificante é um produto utilizado nos mais variáveis equipamentos mecânicos, com o intuito de reduzir o atrito, entre as partes em contato e impedir o desgaste prematuro dos componentes. Com o tempo, esse óleo vai se desgastando, devido ao desprendimento de partículas de metais, ocasionadas pelo desgaste do motor, e pela própria água, resultante da combustão. Quando o desgaste do óleo atinge um limite de contaminação, a qual perde suas características físico-químicas, ele passa a ser chamado de Óleo Lubrificante Usado ou Contaminado (OLUC).

Quando a utilização do óleo chega ao final, muitas vezes, é descartado ao meio ambiente, em rios, sistema de esgoto, ou queimado clandestinamente. Essa destinação inadequada, do OLUC, é um risco para a saúde humana e para o meio ambiente, pois em sua composição, há substâncias químicas perigosas. Quando lançado em rios, o OLUC promove uma camada superficial, que bloqueia a passagem de luz solar e de oxigênio, os quais não necessários para a vida aquática. Já, quando são queimados, clandestinamente, liberam gases tóxicos ao meio ambiente (TSAMBE et al., 2017).

No começo dos anos 2000, a média da utilização de óleos lubrificantes, pelo mundo, foi de aproximadamente 36 milhões de toneladas ao ano, como ilustra a Figura 2. A região que possuiu o maior consumo médio anual, de óleos lubrificantes, foi a Ásia, com cerca de 41%, seguido dos Estados Unidos da América, com um consumo de 20%.

Figura 2: Consumo de óleo lubrificante no mundo 2002-2011



Fonte: Adaptado de (RAC; VENCL, 2012)

O uso de óleos lubrificantes, podem, ser classificados em dois seguimentos principais, o automotivo, o qual representa mais de 65% de toda a utilização, e o industrial, o qual representa, aproximadamente, 35% de sua utilização (RAC; VENCL, 2012).Para se ter uma ideia, no ano de 2012, foram consumidos, cerca de 45 bilhões de óleo lubrificante, os quais geraram, 30 bilhões de litros de OLUC. E nos EUA, conforme a National Oil Recycles, aproximadamente 758 milhões de litros de OLUC, não tiveram uma destinação final correta, sendo gerenciada por métodos clandestinos e irregulares, como o descarte em sistemas de esgoto, rios e aterros, ocasionando a poluição pelo petróleo. Já, no Brasil, conforme o boletim de lubrificantes do Instituto Brasileiro de Petróleo (PETRóLEO, 2024), em 2023, foram rerrefinados mais de 580 mil m^3 de OLUC, dos quais, aproximadamente 380 mil m^3 foram convertidos em óleo básico, de qualidade igual à um óleo básico, produzido em primeiro refino.

De acordo com o (CONAMA, 2005), resolução 362 de junho de 2005, o descarte de OLUC em solos ou cursos de água, assim como, sua queima, causam danos ambientais e produzem gases residuais nocivos ao meio ambiente e à saúde pública e, portanto, em seu Artigo n°1, define que todo óleo usado ou contaminado deverá ser recolhido e passar por uma destinação final adequada, por meio do rerrefino, de modo, a não afetar negativamente o meio ambiente, e recuperar o máximo possível, de seus constituintes.

Desse modo, o Artigo n°2 afirma as seguintes definições:

- O **coletor**, deve ser uma pessoa jurídica autorizada pela indústria do petróleo e ser licenciada pelo órgão ambiental competente para realizar a coleta do OLUC.
- O **gerador**, o qual pode ser uma pessoa física ou jurídica, é a pessoa que faz a utilização dos óleos lubrificantes, gerando assim, o OLUC.
- A **reciclagem** representa o tratamento do OLUC, de modo que seu insumo, possa ser reutilizado em outras aplicações.

- O **óleo lubrificante básico** é o principal componente do óleo acabado.
- O **óleo lubrificante acabado** representa o produto formado pelo óleo base, o qual pode conter aditivos ou não.
- **Rerrefino**: representa o processo industrial de retirada de contaminantes, produtos de degradação e os aditivos do óleo lubrificante usado ou contaminado, transformando o OLUC em óleo básico, novamente.
- O **produtor**, **importador** e **revendedor**, como também o **gerador** de óleos lubrificantes acabados, são responsáveis pelo recolhimento do OLUC, para o rerrefino.

A resolução do (CONAMA, 2005), também define que os órgãos mencionados acima, devem coletar, no mínimo, 30% de todo óleo lubrificante acabado, que foi comercializado, anualmente. Junto à essa resolução, define-se que, o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Renováveis, o Órgão regulador da indústria do petróleo e o órgão estadual do meio ambiente, são responsáveis pela verificação do cumprimento dos percentuais de coleta pré-estabelecidos pela resolução.

O processo de rerrefino é constituído por 4 etapas, são elas:

- **Desidratação:** o óleo é separado da água, e outros contaminantes, como solventes e diesel, através de altas temperaturas;
- **Fracionamento:** ocorre a separação das categorias dos óleos básicos, conforme suas diferenças de viscosidade;
- **Clarificação:** O óleo é purificado por meio da adição de ácidos e neutralizantes;
- **Filtração:** ocorre a retirada dos outros componentes de sujidade do óleo, resultando.

Após a realização das 4 etapas do rerrefino, confere-se ao OLUC, as características de óleo básico, novamente. Após o rerrefino, é necessário que seja adicionado ao óleo básico, aditivos, os quais darão ao óleo as propriedades desejas de lubrificação, para que então, ele possa ser utilizado, novamente, na indústria (CONSTROLEO, 2023).

2.1.7 Rerrefino e Reutilização do OLUC

Os óleos lubrificantes, possuem um ciclo de vida, onde servem para lubrificar os componentes mecânicos e reduzir o atrito, entretanto, a partir do momento em que o óleo perde suas características físico-químicas, ele precisa ser recolhido e tratado.

Ao serem utilizados, os lubrificantes deterioram-se, devido à sua oxidação ou mistura com outros óleos e produtos associados, sem contar sua própria oxidação. Em sua composição há metais pesados, tais como: chumbo, cobre, níquel e cádmio, os quais tornam o óleo lubrificante uma substância perigosa. Devido á essa periculosidade, vários países estão realizando estudos para adquirir uma gestão que reduza o seu impacto ambiental, associado à seu uso, e também, uma forma de aproveitar mais a recuperação de seus compostos durante a reciclagem, reduzindo os custos para a

produção e logística reversa. Existem algumas organizações que trabalham para a instalação de pontos de coleta de óleo usado e que regulam sua utilização, para evitar que tal produto seja utilizado de forma ilegal, prejudicando o ecossistema ou até mesmo seres humanos através do ar e água. O rerrefino é o processo no qual ocorre a retirada de contaminantes, aditivos degradados, água e asfalto, de modo, a recuperar as características do óleo lubrificante básico. Nesse processo de recuperação do OLB, realizam-se o fracionamento, desasfaltamento e finalização do mesmo, além da retirada da água, presente. No Brasil, após a publicação da CONAMA, foi decidido que todo óleo lubrificante usado deve ser coletado para o rerrefino, sendo atualizada em 2005, onde houve a determinação da obrigatoriedade da coleta e posterior rerrefino, determinando este processo, como o mais seguro, ambientalmente.

Além do rerrefino, há uma outra forma de se utilizar o OLUC, para seu reaproveitamento, a qual é a sua queima. A Queima do OLUC, aproveita-se de sua capacidade energética envolvida, a qual pode ser queimado, sem passar pelos processos de retirada de impurezas ou resíduos. A queima do óleo usado, como fonte de energia calorifica é outro aspecto interessante, conhecida como combustível líquido secundário, o qual pode ser utilizado, desde que respeite as políticas de geração de poluentes. Além do mais, o OLUC possui alto poder calorífico e baixo teor de enxofre, sendo muito bem aproveitado, através de sua queima, para a geração de energia térmica. A queima do óleo usado, é amplamente utilizado por todo o mundo. Nas cimentarias, por exemplo, sua utilização vem crescendo cada vez mais, para a queima em fornos rotativos, onde há a necessidade de grande poder calorífico.

Segundo (CARPIO; SILVA; JORGE, 2003), além da utilização em cimentarias, seu uso é bastante difuso no ramo da fundição de metais, incineradores de produtos químicos e caldeiras à vapor. Em outros países, como os Estados Unidos, são usados fornos para a queima do óleo lubrificante usado, onde sua degradação final, acontece em oficinas e garagens. Entretanto, essa prática não é uma das mais ambientalmente eficazes, pois há um menor controle sobre suas emissões atmosféricas.

Nos EUA, verifica-se os padrões do OLUC, e realizam a queima, caso o produto usado esteja dentro de seus padrões pré-estabelecidos. Já na Finlândia, segundo (UZÊDA, 2014), até 2007, a maior parte do óleo que foi recuperado, era utilizado como combustível, para a queima de resíduos perigosos e em usinas elétricas. Vale ressaltar que a queima indiscriminada do OLUC, gera emissão de gases tóxicos, como óxidos metálicos e outros gases tóxicos, como o enxofre, os quais causam danos ao meio ambiente, e à saúde humana, podendo ser causador de doenças degenerativas e câncer (AMARANTE; ALVA, 2018). Além do mais, segundo (VERDI, 2011), o qual realizou um trabalho sobre ensaio de desgaste, envolvendo óleos com a presença de enxofre, o enxofre é um composto indesejável, presente nos lubrificantes, o qual é altamente corrosivo para os componentes mecânicos.

Outro destino final para o óleo usado é através de sua reciclagem para utilização em motores marinhos, onde sua reciclagem é realizada com o intuito de remover a água, o asfalto e resíduos grosseiros, por meio da destilação, recuperando um óleo marinho com baixo teor de enxofre. Uma outra utilidade para o OLUC, é servir como rejuvenescedor asfáltico, servindo como ligante, e restaurando as propriedades de

asfaltos envelhecidos. Essa ação é possível devido a similaridade dos compostos químicos utilizados no asfalto, fazendo com que os óleos lubrificantes usados consigam se misturar ao asfalto envelhecido sem provocar reações químicas, agregando, novamente, elementos químicos, que foram perdidos pelo envelhecimento, como por exemplo, a recomposição de maltenos, presente na composição asfáltica, tornando uma atitude econômica e ambientalmente sustentável (GRANDO, 2022).

Conforme (CYBIS et al., 2017), ao se utilizar o óleo lubrificante novo, até seu fim de vida útil, ele perde suas propriedades, devido ao excesso de contaminantes, tornando-se OLUC, e consequentemente, perdendo suas características físico-químicas, e portanto, diminuindo drasticamente sua capacidade de lubrificação, devido à oxidação dos aditivos presentes, os quais lhe davam essa característica.

2.1.8 Controle de Qualidade

Para atender à especificações de refrigeração e redução de atrito, e garantir a boa qualidade de atuação dos veículos, o óleo lubrificante automotivo (OLA), passa por ensaios de controle de qualidade, para avaliação de desempenho. Entre os ensaios mais populares, está a determinação da viscosidade, a qual indica a capacidade do óleo fluir e formar uma película lubrificante. Outro ensaio essencial, é a determinação do índice de acidez, que determina a formação de ácidos, durante a utilização do óleo, a qual indica a degradação do mesmo e consequentemente, sua vida útil. Além disso, outro fator importante dos OLA, é sua estabilidade à oxidação térmica, a qual determina a capacidade de resistir à oxidação sob altas temperaturas. Embora a composição química seja de extrema importância para o OLA, é a viscosidade que cataloga e relaciona o tipo de óleo e sua finalidade. A escolha incorreta de um OLA, em relação à sua viscosidade, pode diminuir a eficiência e diminuir a vida útil do motor(SATURNINO; FERNANDES; DUPONT, 2024).

2.1.9 Desenvolvimento Sustentável

A Comissão Mundial sobre Meio ambiente e Desenvolvimento (CMMD), publicou, em 1987, um relatório intitulado de ”Nosso Futuro Comum”, a qual ficou conhecido como ”Relatório de Brandtland”, em referência à presidente da comissão, Gro Harlem Brundtland”. O relatório articulou bases essenciais para o que se entende sobre Desenvolvimento Sustentável, nos dias de hoje. Nesse relatório, Brundtland estabelece o significado de Sustentabilidade, ao dizer: ”Desenvolvimento sustentável é o desenvolvimento que atende às necessidades do presente, sem comprometer a capacidade das gerações futuras de atender às suas próprias necessidades”. Segundo Brudentland, os maiores problemas ambientais globais, eram devido à grande pobreza do Sul, e o modelo de consumo e produção insustentáveis no Norte. Para a presidente da comissão, era preciso ter uma uma metodologia que unisse o desenvolvimento e o meio ambiente, onde tal metodologia, é conhecida, hoje, como Desenvolvimento Sustentável (Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, 1987).

Já, para (DALY, 1991), o desenvolvimento sustentável, são ações de desenvolvimento em que a qualidade de vida não supera a capacidade do planeta Terra de se regenerar, naturalmente, e de degradar os resíduos gerados pelo ser humano, em seu desenvolvimento desenvolvimento. O autor (ALMEIDA, 2002) tem um pensamento semelhante, segundo ele, o desenvolvimento sustentável exige um posicionamento de prevenção, antes de qualquer iniciativa de empreendimento, levando em consideração,

aumentar os pontos positivos e atenuar os pontos negativos, envolvendo o desenvolvimento e o meio ambiente. Ainda, segundo o autor, uma empresa que quer ser sustentável, deve, sempre, levar em consideração os impactos ambientais de suas ações, promovendo, assim, uma melhor reputação.

2.2 Conceitos Básicos

Este tópico serve para apresentar alguns conceitos básicos sobre propriedades que serão discutidos mais a frente, para que o leitor compreenda seus significados e consiga fazer correlações, quando os mesmos forem citados.

Inciando com a viscosidade, já que este termo é bastante utilizado, para classificação de óleos lubrificantes, afetando diretamente em seu poder de lubrificação e resfriamento, na usinagem. Dando sequência, fala-se sobre a rugosidade, parâmetro a qual afeta a severidade do desgaste entre superfícies em movimento relativo, devido à caracterização da superfície das mesmas. Este tópico também menciona o Índice de viscosidade, o qual representa a estabilidade das características do lubrificante, ao ser submetido à variações de temperaturas. Menciona-se, também, o termo Ponto de fulgor, o qual é importante, quando se trata da usabilidade de fluidos inflamáveis. E por fim, explica a importância da molhabilidade dos fluidos de corte, e qual seu impacto nos quesitos de acesso à superfície ferramenta-peça e também, a sua capacidade de refrigeração.

2.2.1 Viscosidade

O poder de lubrificação dos óleos lubrificantes dependem da viscosidade do mesmo. Tendo isso em mente, é necessário analisar essa característica no ramo de lubrificação. A viscosidade representa a resistência ao movimento fornecida pelo fluido. É uma das características mais importantes quando se trata da utilização de fluidos, o qual deve ser mantida dentro dos limites para sua utilização (SILVA, 2021).

Conforme (CAVALCANTE et al., 2016), o parâmetro de viscosidade cinemática é definido, levando em consideração a mudança de temperatura do fluido de 40° à 100℃, onde a partir disso, é avaliado o índice de escoamento/viscosidade de acordo com as mudanças do fluido com a alteração da temperatura.

Segundo (FOX; MCDONALD; PRITCHARD, 2001), a viscosidade é uma propriedade atribuída ao fluido, a qual representa a transmissão do movimento por meio da difusão molecular, onde, quanto maior for a viscosidade do fluido, menor será sua velocidade de movimento. A viscosidade de um fluido representa sua resistência em fluir, onde as moléculas são atraídas umas às outras, pelas outras moléculas vizinhas, e quanto maior for a força intermolecular que as une, maior será a viscosidade do fluido. Fluidos que possuem viscosidade constante para diferentes taxas de cisalhamento, são chamados de fluidos newtonianos. Já os fluidos que possuem diferentes viscosidades, conforme variam a tensão cisalhante sobre ela, são chamados de fluidos não newtoniano.

Se tratando de fluido de corte, a viscosidade precisa ser baixa para garantir a fluides constante, com velocidade suficiente para trocar calor com o ambiente e cumprir seu papel como refrigerante e também carregar o cavaco para fora do sistema peça-ferramenta, em contrapartida, em outros casos, é necessário que seja, relativamente, mais viscoso, para conseguir exercer sua função como lubrificante. Em processos

de usinagem, como os utilizados para acabamento superficial (retifica), onde a velocidade de giro da ferramenta é mais alto, há um aumento maior da temperatura, e nesses casos, um fluido, menos viscoso, consegue fazer o papel de refrigerante, por fluir com mais rapidez e aumentar a dissipação de calor. Já em processos de desbaste, onde a retirada de material é maior, e a velocidade de giro é menor, um fluido de corte mais viscoso, garante um maior poder de resistência ao desgaste, já que flui com uma velocidade menor, garantindo uma película protetora, superficial, no sistema peça-ferramenta, reduzindo o atrito (MUNIZ, 2008). Além do mais, a viscosidade afeta, em outro aspecto a usinagem, como o seu acesso de penetração. pois, quanto mais viscoso for o fluido de corte, menor será sua capacidade de atingir a aresta de corte, o qual reduziria a capacidade de lubrificação do sistema (MUNITOR, 2013).

Conforme (ARANTES, 2001), uma viscosidade mais baixa permite um melhor escoamento por cavidades mais acentuadas, sendo recomendada a sua utilização, quando se deseja adquirir tolerâncias dimensionais mais precisas ou em acabamentos superficiais, onde permite-se que o fluido percorra, facilmente, por folgas. Já um fluido mais ”espesso”, trabalha melhor em processos de desbaste, onde o intuito é reduzir o coeficiente de atrito, através de uma lubrificação mais acentuada. Ou seja, fluido de corte deve possuir uma viscosidade equilibrada, de modo a ser suficientemente alta para aderir às superfícies e baixa para atingir as superfícies.

2.2.2 Rugosidade

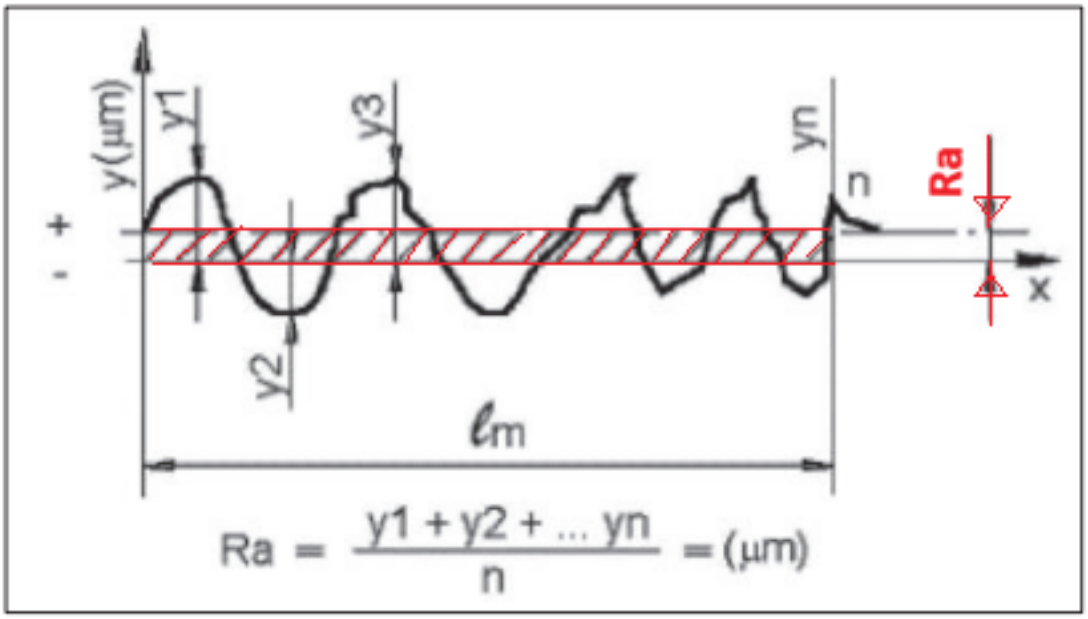
A rugosidade superficial é caracterizada pelas micro-irregularidades deixadas na superfície do material após seu processo de fabricação, e sua unidade de medida é o micrômetro. Tais irregularidades são, em geral, sobrepostas a outras irregularidades geométricas, que podem ser decorrentes da vibração relativa entre a ferramenta cortante e a peça a ser usinada e também irregularidades que caracterizam os erros de forma da superfície.

A rugosidade, em mecânica de precisão, afeta varias propriedades físicas do material, como níveis de atrito, desgaste e tipo de lubrificação, em peças de deslizamento, transmissão de calor e resistência mecânica.

A rugosidade de superfície, ou textura superficial, é definida por meio de parâmetros relacionados à altura (amplitude) e largura das irregularidades, ou uma combinação dos mesmos. Os parâmetros, comumente usados, são: R_a, R_q, R_z.

O parâmetro R_a representa a rugosidade média, que é definida pela amplitude média do perfil, em relação à uma linha de referência, sobre um comprimento do perfil correspondente à cada comprimento amostral considerado. Um limitante da utilização de R_a é o fato dele não fazer distinção entre picos e vales, ou seja, utiliza um valor médio das amplitudes aferidas. A Figura 3, ilustra como é realizado o cálculo do parâmetro R_a, para a medição.

Figura 3: Perfil de Rugosidade R_a



Fonte:Adaptado de (CELESTINO, 2015)

A soma absoluta das áreas compreendidas entre a linha média e o perfil de rugosidade determina a área de um retângulo ideal. Quando essa figura adota o percurso de medição (l_m) como comprimento, a sua altura passa a corresponder à grandeza em questão (CELESTINO, 2015).

O parâmetro R_q também indica a amplitude média das irregularidades de superfície, entretanto, o valor de R_q faz distinção entre picos e vales, fazendo com que os picos e vales tenham uma importância maior, durante o cálculo da amplitude média. Portanto, uma comparação entre os valores obtidos de R_a e R_q geram informações adicionais sobre as irregularidades superficiais. outro fator, é que o valor de R_q pode variar bastante, dependendo do comprimento amostral. Uma limitação da utilização de R_q, é que ele é muito sensível a picos e vales, ou seja, se a superfície for predominantemente lisa, mas tiver um único ponto profundo, ou acentuado, fará com que o valor de R_q eleve-se drasticamente. Outro fator de limitação, é que R_q não diferencia o tipo das irregularidades, ou seja, perfis agudos de perfis arredondados, por exemplo.

Por fim, o parâmetro R_z, indica a altura das irregularidades, correspondendo à média dos cinco maiores picos e cinco maiores vales, ao longo da medição. Diferentemente de R_a e R_q, que calculam uma média das irregularidades, R_z calcula a soma do pico mais alto com o vale mais profundo. Uma das limitações de R_z, é que ele não representa o conjunto todo de medições, dependendo, somente, dos picos e vales, para seu cálculo, ou seja, ao analisar uma superfície, predominantemente lisa, pode gerar um valor alto de R_z, caso haja um único ponto alto e baixo. (CARPINETTI et al., 1996).

Superfícies com rugosidades mais baixas, quando em movimento, com outra superfície, acarretará no deslizamento da superfície rugosa, sobre a outra, promovendo o seu riscamento. Já, caso a superfície possua uma rugosidade mais acentuada, poderá prender partículas soltas no sistema, promovendo um desgaste por rolamento (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2013).

Uma superfície que apresente, um R_z alto, implica que em alguns pontos da su-

perfície, há picos e vales evidentes, mas que não representam a rugosidade da superfície, em geral. Já, quando a superfície possui um R_a próximo de R_q, isso implica, que a superfície, de um modo geral, possui uma rugosidade semelhante. Quando, não, R_a e R_q são bem distintos, implicando em uma superfície com picos e vales, evidentes, em alguns pontos, indicando o grau de disparidade da rugosidade, pela superfície (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2013).

Um experimento foi desenvolvido com o objetivo principal de investigar o comportamento de atrito e desgaste do aço AISI 1045 sob diferentes parâmetros de rugosidade superficial inicial em condições de deslizamento a seco, avaliando diretamente aspectos como o tempo de transição do desgaste estável inicial (running-in), a perda de massa e volume, e a deformação por cisalhamento gerada na subsuperfície do material. Para a realização dos testes mecânicos, foram utilizados corpos de prova comerciais de aço AISI 1045 com dureza de 34 HRC, cuja microestrutura metalográfica inicial apresentou-se composta por grãos ferríticos e perlíticos lamelares em uma proporção aproximada de 1:1, com dimensões que variavam de 20 a 30 µm. Como contracorpo para promover o desgaste por deslizamento, utilizou-se um pino contendo uma esfera de 5 mm de diâmetro fabricada em aço de rolamento GCr15 com dureza de 63 HRC. O processo de preparação e modificação das superfícies dos espécimes foi executado por meio de retificação tangencial profunda a seco (CFDG) em um centro de usinagem vertical CNC, utilizando um rebolo de nitreto de boro cúbico (CBN) monocamada eletrodepositado operando a uma velocidade periférica constante de 93 m/s. Modificando-se apenas as taxas de avanço da ferramenta durante a retificação, foi possível induzir diferentes texturas superficiais e distribuições geométricas de asperezas sem causar alterações na microestrutura, transformações de fase ou danos térmicos na subsuperfície do aço. Essa metodologia de usinagem gerou seis condições distintas de rugosidade superficial que foram medidas de forma estatística em cinco localizações diferentes por amostra, como apresenta a Tabela 3.

Tabela 3: Parâmetros de rugosidade superficial inicial das amostras.

Amostra	R_a **(**μ**m)**	R_q **(**μ**m)**
No. 1	1,127	1,520
No. 2	0,805	0,970
No. 3	0,689	0,867
No. 4	0,449	0,543
No. 5	0,263	0,314
No. 6	0,108	0,140

Fonte: Adaptado de (LIANG et al., 2018)

Com as superfícies devidamente caracterizadas, os ensaios de atrito e desgaste foram conduzidos em um tribômetro multifuncional pino-sobre-disco (modelo CFT-1), mantido sob condições controladas de temperatura ambiente em 20 ℃ e umidade relativa do ar na faixa entre 23% e 25%. Uma carga externa axial de 10 N foi continuamente aplicada sobre o pino, forçando o contato direto da esfera contra a pista retificada do disco com uma rotação estável do fuso em 800 r/min. Cada corpo de prova foi submetido a essas condições por um período de funcionamento total fixado em 1800 segundos. Ao longo do tempo de deslizamento, o sistema utilizou sensores

de aceleração integrados a placas de aquisição de dados para monitorar em tempo real as flutuações, as frequências e as amplitudes do coeficiente de atrito, fornecendo as variáveis necessárias para quantificar a perda de massa, a largura e a profundidade dos canais desgastados, e o subsequente comportamento de deformação na subsuperfície do aço AISI 1045.

Concluiu-se, observando inicialmente, que superfícies de aço AISI 1045 com valores mais altos de rugosidade inicial R_a e R_q resultam em um coeficiente de atrito médio maior e em um período de transição inicial-estável (*running-in*) consideravelmente mais longo. Além disso, constatou-se que, no ensaio de deslizamento a seco, a perda de peso e volume permanece estacionária e no mesmo nível para espécimes com valores de rugosidade inicial abaixo do limite de $R_a \leq 0,3$–$0,5$ μm e $R_q \leq 0,1$–$0,4$ μm, indicando que não é economicamente vantajoso ou preferível tentar aumentar a resistência ao desgaste reduzindo a rugosidade além desse limite. A análise microestrutural revelou também que a deformação plástica concentra-se predominantemente na profundidade de 20 a 50 μm abaixo da superfície desgastada, ocorrendo de forma crítica e severa nas amostras com alta rugosidade inicial. Esse processo induz o refino de grãos por meio de uma severa deformação mecânica na zona de fragmentação, o que reduz a detecção de elementos de liga combinados à medida que a rugosidade inicial se eleva. Por fim, verificou-se que os parâmetros de rugosidade inicial afetam diretamente a descarbonetação mecânica subsuperficial, fazendo com que superfícies com grandes valores de R_a e R_q percam o elemento C com maior facilidade em decorrência do efeito severo de extrusão recíproca sofrido pelo material (LIANG et al., 2018).

2.2.3 Índice de viscosidade (IV)

O índice de viscosidade indica, o comportamento de um fluido, conforme a sua variação de temperatura, ou seja, representa a variação de viscosidade em função da temperatura. Há uma diferença entre a viscosidade e o índice de viscosidade, onde, enquanto a viscosidade é representada pela resistência de um fluido ao escoamento, o índice de viscosidade representa a sua variação de viscosidade, ao se variar a temperatura.

Lubrificantes com índices de viscosidades maiores são mais estáveis, quando submetidos à diferentes graus de temperatura, onde, quanto maior for o índice, menor é sua variação e estabilidade. Entretanto, os óleos que apresentam índices mais baixos de viscosidade, demonstram uma menor estabilidade, apresentando variações em sua viscosidade, conforme se aumenta a temperatura; demonstrando uma relação inversamente proporcional, onde, quanto maior o índice de viscosidade, menor são suas variações de viscosidade, sob a ação da temperatura.

Um lubrificante com alto IV, indica que, mesmo sob altas temperaturas, ele mantém a resistência do filme de óleo, garantindo a proteção dos equipamentos mecânicos. Quando esses óleos são expostos à baixas temperaturas, ele chega até os pontos de atrito, e também, reduzindo seu desgaste, permitindo que os equipamentos iniciem rapidamente, mantendo o desempenho por mais tempo.

Alguns fatores influenciam no IV dos óleos, como sua porcentagem de enxofre e ácidos graxos saturados. Lubrificantes com alto teor de saturados, os quais apre-

sentam cadeias moleculares lineares e longas, apresentam uma viscosidade maior, devido às suas forças intermoleculares serem mais fortes. A presença de altos teores de saturados também implicam em um IV mais alto, garantindo a estabilidade de sua viscosidade sob altas e baixas temperaturas. O teor de enxofre, presente nos lubrificantes, indicam a pureza e o grau de refino dos óleos, onde quanto menor o seu teor, indica um refino mais profundo. Um lubrificante que possui um baixo teor de enxofre e um alto teor de ácidos graxos saturados, apresentam uma maior estabilidade e pureza, proporcionando um alto índice de Viscosidade. Além do mais, um teor de enxofre alto provoca uma maior taxa de oxidação, causando a aceleração da degradação do óleo, sem contar que provocam um maior impacto ambiental.

A utilização correta de óleos lubrificantes, seguindo as indicações do fabricante, implica em redução das temperaturas de trabalho, atenuação do desgaste dos componentes, redução do consumo de combustíveis, entre outros fatores, como proteção contra oxidação, e deterioramento do próprio lubrificante (SILVA, 2023).

Nos ensaios de desgaste, o índice de viscosidade (IV) influencia em como o óleo vai se comportar durante todo o processo, seja em ensaios, ou em processos de usinagens. Isso porquê, IV expressa o quão estável será o fluido, quando submetido à variações de temperaturas. Nos processos de usinagem, um dos fatores que acarretam no desgaste da ferramenta e na redução da precisão do corte na peça, é a temperatura, que conforme o passar do tempo, vai aumentando, dependendo do processo que está sendo utilizado para a retirada de material. Levando em conta a importância do resfriamento do sistema ferramenta-peça, o IV tem um papel importante, quando se trata de fluidos de corte, pois um índice de viscosidade alto, implica que o fluido terá um comportamento mais estável, em relação a sua viscosidade, conforme o aumento de temperatura ocorre. Caso o fluido tenha viscosidade e um índice de viscosidade alto, significa que, sua viscosidade, no fim do processo de usinagem, conforme aumenta-se a temperatura, manterá um valor mais próximo do valor inicial, ou seja, sua viscosidade não se distanciará tanto, do que era no inicio, permanecendo alta. E para processos de usinagem de alta velocidade de giro, onde há uma maior temperatura agregada, ter um fluido de corte, com viscosidade alta, implicaria em uma menor capacidade de resfriamento, durante o processo, por exemplo.

Nos processos de usinagem, dependendo de sua finalidade, seja o desbaste, ou o acabamento superficial, os quais agregam situações diferentes, de desgaste, utiliza-se diferentes fluidos de corte, seja com um potencial maior de lubrificação ou de refrigeração, utilizando-se um fluido que mais se adéqua a situação. Portanto, ao escolher um fluido de corte, para determinada situação, espera-se que o fluido, mantenha um desempenho estável, pelo qual o mesmo foi selecionado, durante todo o processo. Caso contrário, ao ser submetido a variações de temperatura, o óleo pode não se comportar da maneira desejada, não cumprindo o papel pelo qual foi selecionado, levando à um resultado não desejado (OZAKIN, 2023).

O estudo conduzido por Trivedi e Bhatt (2017) teve como objetivo principal avaliar o comportamento de atrito e de desgaste de materiais comumente aplicados em camisas de cilindro e anéis de pistão de motores de quatro tempos. Para a execução da simulação laboratorial, os autores utilizaram um tribômetro do tipo pino sobre disco (Pin-on-disc), modelo TR20LE. Os ensaios foram realizados utilizando discos confeccionados em ferro fundido cinzento (material representativo das camisas de cilindro)

com dureza de 79,8 HRC e pinos acoplados a segmentos reais de anéis de pistão de um motor comercial de 100cc. As condições operacionais do experimento envolveram dois tipos de carregamento aplicados ao longo de um tempo fixo de 105 minutos por teste: um ensaio sob carga constante de 140 N e outro sob carga incremental escalonada na faixa de 20 N a 140 N, sofrendo acréscimos de 20 N a cada 15 minutos. O desgaste gerado na interface foi monitorado de forma contínua em micrômetros (µm) e quantificado analiticamente por meio da perda de massa em miligramas (mg) dos corpos de prova antes e após o término de cada procedimento. Os resultados experimentais evidenciaram que o regime de carregamento incremental provocou taxas de desgaste severamente maiores do que a condição de carga constante, uma vez que a aplicação súbita de força causou rupturas sucessivas na película lubrificante. Nesse cenário, o Índice de Viscosidade (IV) associado à viscosidade cinemática dos lubrificantes desempenhou um papel determinante na severidade do desgaste gerado. Fluidos caracterizados por uma maior estabilidade térmica frente à temperatura e maior viscosidade, como o SAE 20W50 (IV = 126) e o SAE 20W40 (IV = 114), apresentaram o melhor desempenho tribológico no ensaio. Esses lubrificantes conseguiram manter um filme fluido uniforme e espesso o suficiente para operar predominantemente no regime de lubrificação mista, garantindo uma distância de separação eficiente que evitou o contato direto entre as asperezas metálicas e atenuou o desgaste do par. Em contrapartida, o lubrificante SAE 10W30, detentor do menor Índice de Viscosidade avaliado (IV = 102) e menor viscosidade, mostrou-se incapaz de sustentar uma barreira física robusta sob carga. A fragilidade e a baixa espessura de sua película lubrificante fizeram com que o contato operasse sob regime de lubrificação limítrofe (boundary). Como consequência direta dessa severidade provocada pela queda na capacidade de suporte de carga do filme fino, o óleo de menor IV resultou na maior perda de massa e no maior volume de desgaste linear registrado entre todos os fluidos testados no tribômetro (TRIVEDI; BHATT, 2017).

2.3 Desgaste

Desgaste é o processo de perda de material através de duas superfícies que foram friccionadas uma contra a outra. Onde o movimento relativo entre as superfícies leva à alterações nas mesmas, retirando material de pelo menos uma das superfícies. O desgaste é associado ao atrito, e os métodos utilizados para a remoção de material são classificados como desgaste adesivo, desgaste corrosivo, desgaste abrasivo, entre outros (MELLOR, 2006), os quais são descritos a seguir. Entretanto, o foco deste trabalho será no desgaste abrasivo.

2.3.1 Desgaste Adesivo

O desgaste adesivo ocorre quando as superfícies de contato estão submetidas a pressões extremas, assim, quando as superfícies são pressionadas umas contra as outras, é possível a formação de uniões, causando transferência de material de uma superfície para a outra, tal processo é também conhecido como soldagem a frio. Posteriormente, com o deslizamento de uma superfície sobre a outra, há o rompimento dessas uniões, gerando superfícies danificadas e fragmentos soltos, tais fragmentos podem contribuir para que haja um outro tipo de desgaste, o desgaste abrasivo, como será visto em tópicos mais a frente.(FERRAMENTAL, 2019).

O desgaste adesivo pode ser considerado um desgaste fundamental, pois ocorre sempre que duas superfícies sólidas estão em contato de fricção, mesmo estando lubrificadas, ainda permanecem até mesmo quando todos os outros tipos de desgastes são eliminados, e isso deve-se ao fato de não ser possível a eliminação completa das ranhuras nos materiais em contato, as quais são responsáveis pelas uniões entre as superfícies(JR, 1957).

O desgaste por adesão pode ocorrer quando as forças de contato entre os materiais são elevadas e isso pode ocorrer em diversos sistemas tribológicos, como por exemplo: em engrenagens, rolamentos, mancais e ferramentas de conformação, os quais podem ter seus desgastes adesivos reduzidos com o uso de lubrificantes adequados, ou com a utilização de materiais com maior resistência ao desgaste (METALURGIA, a).

2.3.2 Desgaste Corrosivo

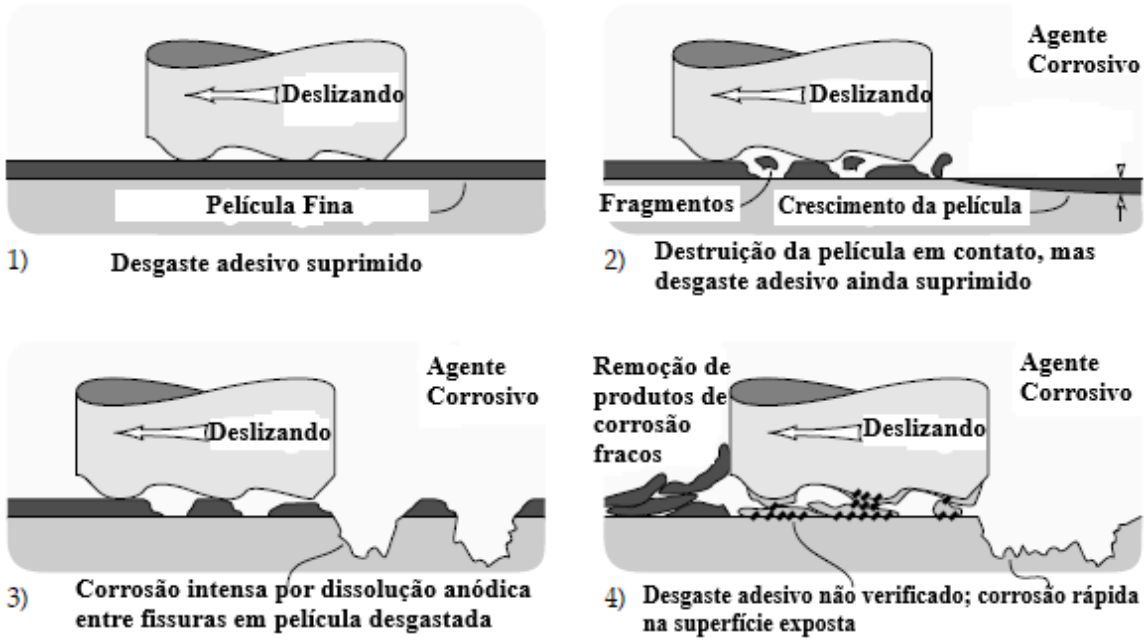
O desgaste corrosivo ocorre com ou sem a utilização de lubrificantes, onde a causa fundamental dessa forma de desgaste é uma reação química que ocorre entre o material desgastado e um meio corrosivo, como um reagente químico, um lubrificante reativo ou até mesmo o ar. O desgaste corrosivo é um termo dado para qualquer forma de desgaste dependente de um processo químico, quando essa ”corrosão”ocorre por meio do oxigênio, é chamado de desgaste oxidativo. Essa forma de desgaste ocorre de forma rápida e geralmente é acompanhada de uma diminuição do coeficiente de atrito (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2013).

Segundo Stachowiak e Batchelor, se não forem controladas, as reações químicas superficiais, que são benéficas na prevenção do desgaste abrasivo, levarão à uma perda considerável do material. Se um metal for corroído para produzir uma película em sua superfície, enquanto é simultaneamente submetido à um contato deslizante, então um dos quatro processos seguintes pode ocorrer:

- Pode ser formada uma película lubrificante durável que inibe a corrosão e o desgaste;
- Pode ser produzida uma película fraca, com um tempo de vida curto sob contato deslizante e pode ocorrer uma elevada taxa de desgaste devido à formação regular e destruição das películas. O coeficiente de atrito pode ou não ser baixo neste caso;
- As películas protetoras da superfície podem ser desgastadas (por exemplo, por corrosão) e um acoplamento galvânico entre as películas restantes e o substrato subjacente pode resultar em corrosão rápida da área desgastada na superfície;
- Os processos corrosivos e de desgaste podem agir de forma independente para causar uma perda de material, que é simplesmente a soma desses dois processos somados.

Há diversas interações entre um agente corrosivo e uma superfície desgastada, como representa a Figura 4.

Figura 4: Modelos de interação entre um agente corrosivo e uma superfície desgastada.



Fonte: Adaptado de (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2013)

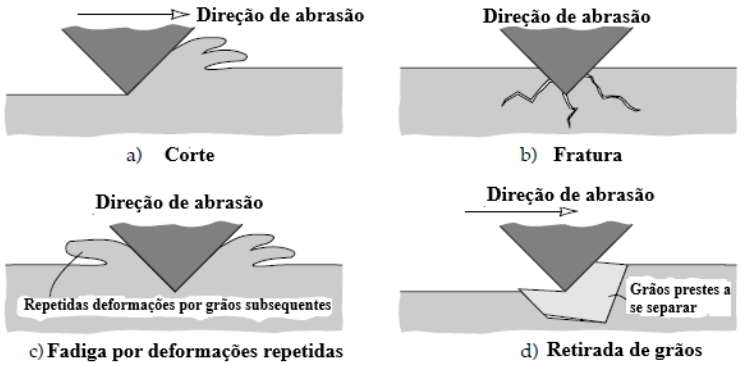
2.3.3 Desgaste Abrasivo

O desgaste por abrasão é uma forma de desgaste por uma partícula e um material sólido, é a perda de material pela passagem de partículas duras sobre uma superfície. A abrasão é uma forma rápida e severa de desgaste, e podem resultar em custos significativos se não for adequadamente controlada.

O desgaste abrasivo ocorre sempre que um objeto sólido é pressionado contra partículas de um material com dureza igual ou superior. A magnitude do desgaste abrasivo é muito maior do que se pode imaginar, pois qualquer material, mesmo que seja macio, pode causar desgaste abrasivo se houver partículas duras presentes. Por exemplo, a cana-de-açúcar está associada ao desgaste abrasivo dos cortadores e trituradores de cana, devido à pequena fração de sílica presente na planta (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2013). Os mecanismos de desgaste abrasivo são descritos a seguir, seguido de métodos de seu controle.

Inicialmente, pensava-se que o desgaste abrasivo por grãos se assemelhava ao corte de uma ferramente ou de uma lima. No entanto, o exame microscópico revelou que o processo de corte só é aproximado pelos grãos mais afiados. As partículas ou grãos podem remover material por micro-corte, micro-fratura, arrancamento de grão individual ou fadiga acelerada por deformações repetidas, Conforme representados na Figura 5.

Figura 5: Formas de remoção de material por desgaste abrasivo

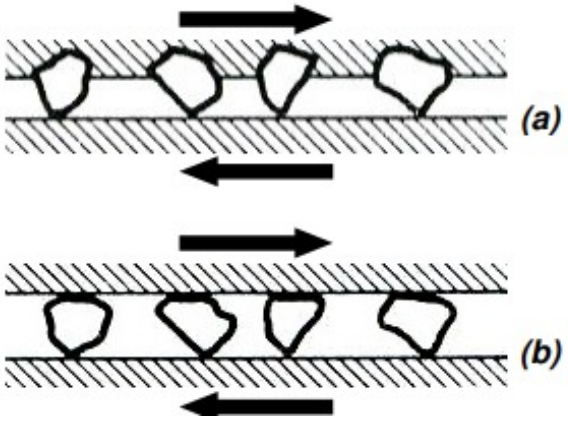


Fonte: Adaptado de (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2013)

O desgaste abrasivo, também pode ser do tipo ”riscamento”, ou desgaste abrasivo a dois corpos, como também é conhecido. Esse tipo de desgaste tem como base, o encrustamento de partículas em uma ou mais superfícies, fazendo com que elas deslizem sobre o corpo de prova, gerando marcas pelas partículas abrasivas no corpo de prova, por meio de partículas mais duras que a outra superfície de contato.

Há também, o desgaste abrasivo por rolamento, o qual é bem parecido com o desgaste abrasivo por riscamento, mas nesse caso, as partículas abrasivas não se encontram encrustadas em uma das superfícies, mas sim, soltas entre elas. A Figura 6, a seguir, ilustra os dois processos abrasivos.

Figura 6: Desgaste abrasivo a) Por riscamento b) Por rolamento



Fonte: (COZZA, 2011)

2.3.4 Mecanismos de Desgaste

O desgaste de ferramentas de usinagem é um limitador do tempo de vida da ferramenta, gera consome tempo com a sua manutenção. A seguir, será mencionados, os mecanismos responsáveis por desgastes em ferramentas de corte.

2.3.5 Abrasão Mecânica

Um dos principais fatores de desgaste da ferramenta é a abrasão mecânica (atrito), que é responsável tanto pelo desgaste frontal, quanto pelo desgaste de cratera, entretanto, a peça sofre mais sob o efeito do desgaste frontal, pois a superfície de folga atrita diretamente com a peça, enquanto a superfície de saída atrita com a passagem do cavaco. Esse tipo de desgaste é promovido pelas partículas duras, presentes do material da peça, e pelas altas temperaturas de corte, as quais causam a redução de dureza na ferramenta. Nesse aspecto, quanto maior for a dureza à quente da ferramenta, maior será sua resistência ao desgaste abrasivo, sob altas temperaturas (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014).

2.3.6 Aderência

Quando duas superfícies metálicas estão em contato sob média carga, baixa velocidade de corte e temperatura, se produz um extrato metálico, gerando aderência, e provocando a ruptura de um dos metais, ao invés de causar a separação das duas superfícies. Esse fenômeno acontece, devido à alta resistência do extrato e faz com que partículas da superfície de um dos metais, migre para a superfície do outro, promovendo a formação de uma aresta postiça de corte. Entretanto, o desgaste por aderência pode ocorrer, sem a formação de aresta postiça. Para a redução desse tipo de desgaste, utiliza-se o fluido de corte, devido à sua ação como lubrificante, e o cobrimento da superfície da ferramenta, com materiais de baixo coeficiente de atrito, como o nitreto de titânio. Segundo (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014), a profundidade de usinagem irregular e a falta de rigidez promovem um fluxo irregular do cavaco, os quais facilitam o desgaste por aderência.

2.3.7 Difusão

Trata-se da difusão entre a ferramenta e o cavaco, causado pela temperatura na zona de corte, o qual ocasiona fenômenos microscópicos. Tal fenômeno transfere átomos de um metal para outro, dependendo da afinidade físico-química entre os metais, da duração do contato entre eles e, também, da temperatura na zona de fluxo. Os átomos de ferro do cavaco de aço são transferidos para a ferramenta, principalmente se o aço for duro, e muda as condições de equilíbrio dos constituintes da ferramenta, ocasionando reações químicas entre ferramenta e cavaco. Tais reações provocam a formação de carbonetos, os quais são menos resistentes e podem ser removidos por meio da abrasão. Também é possível que haja a difusão de átomos da ferramenta para o cavaco, entretanto, neste caso, o desgaste é menor. O fenômeno de difusão provoca, principalmente, o desgaste de cratera em altas velocidades de corte, já que é na superfície de saída da ferramenta que se tem o necessário para a difusão, como altas temperaturas e o contato entre ferramenta e o cavaco.

2.3.8 Oxidação

Para a maioria dos metais, a combinação de água e ar, ocasionam a oxidação. O Tungstênio e o cobalto, por exemplo, formam óxidos porosos sob a ferramenta, os quais são facilmente removidos pelo atrito, provocando o desgaste. O desgaste por oxidação, ocorre, geralmente, nas extremidades do contato entre a ferramenta e o

cavaco, devido a maior presença de ar nesses locais, e isso explica o aparecimento do desgaste de entalhe.

2.3.9 Desgaste de Cratera

O desgaste de cratera acontece na superfície de saída da ferramenta de corte e é gerado pelo atrito entre a ferramenta e o cavaco. O parâmetro K_m é a medida do centro da cratera até a aresta de corte, como mostra a Figura 7

Figura 7: Desgaste de Cratera



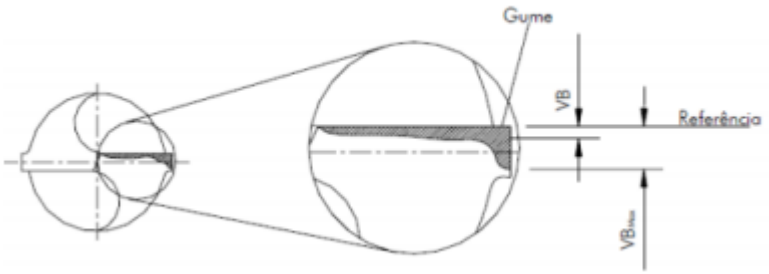
Fonte: Adaptado de (CORAZZIM, 2018)

A cratera gerada influencia o ângulo de saída da ferramenta e o comprimento de cavaco-peça. Este tipo de desgaste está associado à altas temperaturas envolvidas entre a ferramenta e a peça, devido à fenômenos de difusão e adesão. Já a profundidade e a largura da cratera, são relacionados com a velocidade de corte e o avanço, utilizados no processo (FERRARESI, 1997).

2.3.10 Desgaste de Flanco

O desgaste frontal, também conhecido como desgaste de flanco, ocorre na superfície de folga da ferramenta e é causado pelo contato entre a ferramenta e a peça, como ilustra a Figura 8.

Figura 8: Desgaste de Flanco



Fonte: (CORAZZIM, 2018)

Esse tipo de desgaste ocorre nas superfícies de folga da ferramenta, em regiões onde não há o contato direto com a peça, e sim, com o cavaco gerado. Esse local

específico, localiza-se entre as arestas de corte primárias e secundárias, e pode ocorrer de atingi-las. Em situações onde o desgaste de flanco atinge a aresta principal de corte, começam a haver um aumento da temperatura e da força de corte no processo, resultando em vibrações no sistema ferramenta-peça. No entanto, quando o desgaste atinge a aresta de corte secundária, responsável pela exatidão das dimensões de corte e qualidade do acabamento superficial da peça, o desgaste pode ocasionar peças com dimensões diferentes da esperada e com acabamento superficial prejudicado.

O desgaste de flanco é o que apresenta o maior potencial de irregularidades para a peça, pois quando ocorre, aumenta-se a potência necessária para a usinagem. Por causa deste grande potencial de danos à peça, o desgaste de flanco é utilizado como parâmetro para se determinar o fim de vida de uma ferramenta (NOVAIS, 2022).

2.3.11 Desgaste de Entalhe

Segundo (NOVAIS, 2022), o desgaste de entalhe aparece na região de contato entre a ferramenta e o cavaco, ocasionado pelo atrito na lateral do cavaco. Tal desgaste ocorre na região entre a superfície de folga e saída da ferramenta. O desgaste ocorre em usinagens de materiais de alta resistência e sob altas temperaturas como os aços inoxidáveis austeníticos e duplex e ocorre fora da região de usinagem.

2.3.12 Considerações sobre os Mecanismos de desgaste

O desgaste de flanco é ocasionado, principalmente pela abrasão, gerada pelas altas velocidades de corte e pelo cisalhamento da aresta postiça de corte. Já o desgaste de cratera, é ocasionado pela difusão. E o desgaste de entalhe é causado, devido à aderência e à oxidação.

Sob baixas velocidades de corte, o desgaste é maior por causa da remoção da aresta postiça de corte e aderência. Já, em relação à utilização de altas velocidades de corte, o desgaste é ocasionado, principalmente, devido à fatores relacionados com a temperatura de corte, como a abrasão mecânica, a difusão e a oxidação (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014).

2.3.13 Desgaste Dos Aços Rápidos

O primeiro impacto causado pelos aços-rápido ocorreu na virada do século XIX, data na qual surgiu sua descoberta, por Taylor e White. Em sua descoberta, o aço-rápido era composto por 0,67% de C, 18,91% de W, 5,47% de Cr, 0,11% de Mn e 0,29% de V, além de passar por tratamentos térmicos. Após sua descoberta, seu anuncio foi feito pelo Journal Of Polictial Economy, em 1900, destacando a novidade. Essa notícia gerou uma revolução na usinagem, na época, pois gerou um grande impacto na produção. O aço rápido proporcionou um grande avanço, pois as velocidades de corte puderam ser aumentadas, indo de 3 a 5 m/min, com os aços carbono, utilizados, anteriormente, para 30-35 m/min, com a utilização dos aços-rápidos em ferramentas, e daí o nome ”aço-rápido”. Depois de mais de um século, esses aços sofreram algumas mudanças, mas ainda persistem, como uma boa opção para ferramentas de corte. Suas principais utilizações, atualmente, são em ferramentas, como:

brocas, fresas, brochas e em ferramentas de torneamento.

Esse material pode ser facilmente encontrado no mercado, hoje em dia, e são classificados pela AISI, através da porcentagem de elementos presentes no aço-rápido, como: carbono, silício, molibdênio, tungstênio e manganês, por exemplo. Existem dois grandes grupos de aços-rápido, os aços ao tungstênio, identificados pela letra T, e os aços ao molibdênio, caracterizado pela letra M.

Os principais elementos de liga dos aços-rápido, são:

- **Carbono:** Com uma representatividade de 0,7 a 1,6%, nas quais representam a dureza, no estado revenido, do aço, quanto maior for o seu teor, devido à formação de carbonetos complexos. O aumento de seu teor de carbono, também aprimora sua resistência ao desgaste.
- **Tungstênio:** O tungstênio é responsável pela formação de carbono, que é relacionado ao aumento da resistência ao desgaste do aço-rápido. Sua composição pode variar, chegando à 20%.
- **Molibdênio:** Esse elemento é uma outra opção para o tungstênio, possuindo metade de seu peso atômico, permite-se utilizar metade de seu peso para proporcionar a mesma quantidade de átomos que se ligarão ao aço. Com um menor ponto de fusão, os aços ao molibdênio necessitam de uma temperatura menor que os aços ao tungstênio, no processo de têmpera, entretanto, possuem durezas à quente, inferiores.
- **Vanádio:** Podem representar de 1 a 5% da composição do aço, sendo um desoxidante formador de carbonetos, nos quais são os mais duros, utilizados nos aços-rápidos. Para se aumentar o teor de vanádio, é necessário, também, que se eleve o teor de carbono, para que não ocorra a ferritização do aço, o qual diminui, drasticamente, a dureza do mesmo. A utilização do vanádio, além de proporcionar o aumento da dureza à quente, proporciona o impedimento do crescimento dos grãos, através dos carbonetos alocados entre os contornos, por meio dos tratamentos térmicos, permitindo um aumento de sua tenacidade. Os aços com alto teor de carbono e vanádio, possuem uma maior resistência ao desgaste e são chamados de aços super-rápidos.
- **Cromo:** O cromo pode representar até 4% do teor do aço, diminuindo a oxidação do mesmo, em tratamentos térmicos.

Em situações, onde é necessário alta dureza sob altas temperaturas, o indicado é utilizar ligas de tungstênio, devido à estabilidade de seus carbonetos, os quais garantem sua estabilidade sob altas temperaturas. Há outros elementos de liga importantes para o aço-rápido, como o molibdênio e o cobalto. A liga metálica com cobalto, pode variar até o teor de 12%, e é uma das mais utilizadas, por permitir velocidades de corte até 30% maiores, que as outras ligas. Entretanto, quando o foco principal for a resistência ao desgaste abrasivo, a liga metálica que se sobressai é o vanádio, e em seguida, o tungstênio e o molibdênio, devido à dureza de seus carbonetos.

O aço rápido é um dos principais materiais utilizados em ferramentas de usinagem, devido à sua alta dureza no estado temperado e sua resistência ao amolecimento sob altas temperaturas. Em sua fabricação, é empregado ao aço ligas de tungstênio, cromo, molibdênio, vanádio e cobalto.

A principal característica desse material, é a capacidade de operar sob altas velocidades, onde a temperatura da ferramenta pode chegar a até 600℃, durante a usinagem. Sob altas temperaturas, esses materiais, ao resfriarem, retomam a dureza original. À essa característica, da-se o nome de ”dureza a quente”e constitui a principal característica dos aços rápidos.

Os aços rápidos possuem uma alta resistência ao desgaste, em relação aos outros tipos de aços ferramenta, e isso se deve ao fato de possuírem um alto teor de carbono e um elevado teor de elementos de liga, formadores de carbonetos, o que aumenta a vida útil da ferramenta.

Os aços rápidos são facilmente endurecidos por têmpera, mesmo pelo resfriamento em salmoura, que é um meio mais severo. Entretanto, seu custo é mais elevado, em relação à outros materiais ferramentais, devido à sua composição química, e operações de tratamentos térmicos, os quais são complexos e demorados. Há, também, uma certa dificuldade na retificação desse tipo de material.

Todos os aços rápidos podem endurecer, no mínimo, 63 Rockwell C, devido ao excesso de carbonetos. Possuem uma temperatura de têmpera de aproximadamente 65℃ abaixo de seu ponto de fusão, oque exige uma certa precisão, durante o aquecimento (MACHADO et al., 2015).

2.3.14 Tribologia

A palavra tribologia vem do grego, onde ”tribos”significa esfregar, atritar; e ”logia”é referente à estudo, portanto, uma definição para a palavra tribologia, seria o estudo dos mecanismos de atrito, lubrificação e desgastes de superfícies (COZZA, 2011).

Segundo o dicionario português Michaelis, o termo Tribologia significa ”Estudo da interação entre superfícies em movimento relativo e das aplicações associadas, tais como lubrificação, desgaste e atrito, bem como suas implicações na biomecânica e no projeto de peças móveis de máquinas.”(TRIBOLOGIA. . . ,)

2.3.15 Importância do conhecimento sobre tribologia

Ter conhecimento sobre tribologia pode representar uma melhora significativa na gestão de manutenção em diversos setores, pois ao compreender como agem os mecanismos de desgaste, é possível realizar estratégias de manutenção, proporcionando uma maior economia, como por exemplo, o aumento da vida útil de ferramentas e maquinários. O conhecimento sobre tribologia permite fazer com que haja um aumento da eficiência dos processos produtivos, pois será possível reduzir o atrito e o desgaste dos componentes.

Entender os aspectos sobre o atrito, desgaste e lubrificação possibilita evitar falhas prematuras ao fazer uma seleção adequada de materiais, lubrificantes e processos de fabricação. Consequentemente, haverá um menor consumo de energia, já que o atrito

é responsável por grandes perdas de eficiência dos equipamentos. Manter ferramentas e maquinários livres de desgaste proporciona, também, uma melhor qualidade no produto acabado, uma vez que uma ferramenta desgastada pode comprometer o acabamento superficial, sem contar que, tal desgaste pode comprometer as dimensões finais desejadas.

Falhas prematuras e, ás vezes, inesperadas, de maquinários, fazem com que haja a paralisação da produção para que seja realizada uma manutenção, e durante esse tempo ocioso da produção, a empresa perde dinheiro e também coloca em risco os funcionários que estão encabidos do concerto.

Com o passar do tempo, a importância sobre o estudo da tribologia vem ganhando cada vez mais espaço, devido ao constante aumento da competitividade industrial, que busca soluções para maiores produtividades a baixos custos. (METALURGIA, b)

2.3.16 Desgaste Micro-Abrasivo Por Esfera Rotativa

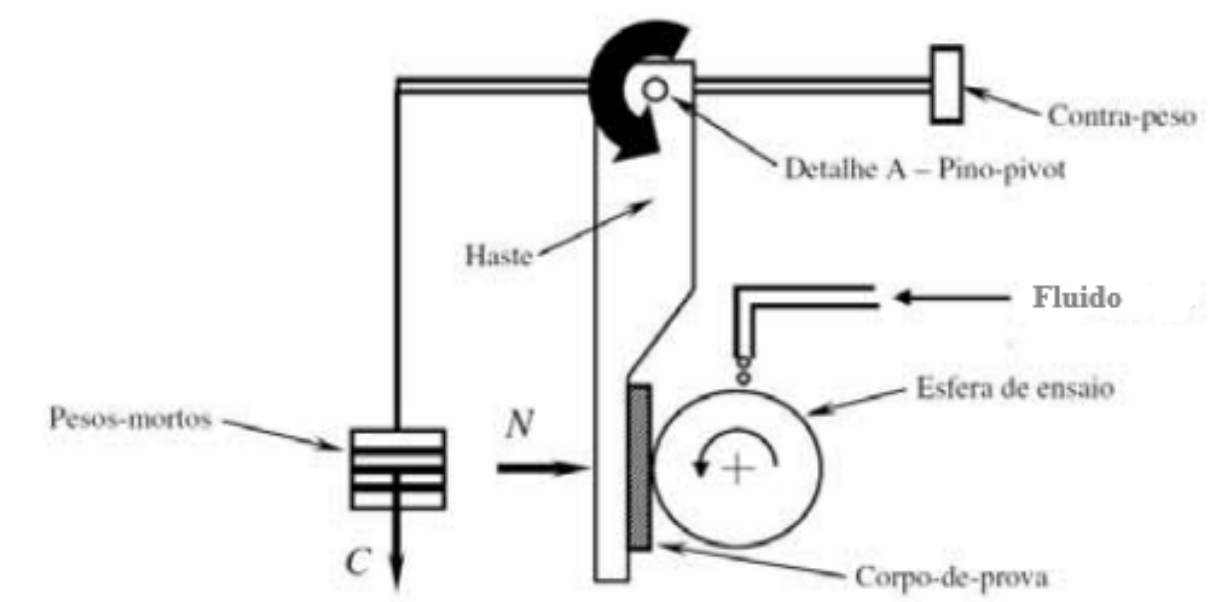
São utilizados revestimentos, em alguns materiais, com o objetivo de aumentar sua resistência ao desgaste e assim, aumentar sua vida útil.

Para isso, existem algumas técnicas de se medir o desgaste sofrido pelo material, para determinado tipo de desgaste. Uma destas técnicas é o teste de desgaste por esfera rotativa, onde permite-se o contato entre uma esfera em rotação e um corpo de prova. Tal contato, gera crateras de desgaste no corpo de prova, a qual podem ser analisadas e usadas para compreender o comportamento de um material ao desgaste sob condições reais de trabalho.

2.3.17 Tribômetro: Esfera Rotativa

O ensaio de desgaste ocorre, a partir do princípio, de que há uma esfera rotacionando em contato com um corpo de prova, o qual será desgastado. O equipamento para tal teste é ilustrado pela Figura 9.

Figura 9: Aparelho de ensaio de desgaste



Fonte: Adaptado de (OLIVEIRA, 2015)

Conforme a Figura 9, é adicionado uma carga (N), por meio de pesos-mortos, que exercerá uma força sobre a haste, forçando o corpo de prova contra a esfera de ensaio. Enquanto isso acontece, há um fluido sendo gotejado, em cima da esfera, o qual poderá ser um abrasivo, ou lubrificante, dependendo do objetivo desejado. O contato do corpo de prova com a esfera em rotação, provoca um desgaste no corpo de prova, o qual pode ser analisado, por meio de um microscópio.

2.3.18 Tipos De Ensaios de Desgaste Abrasivo

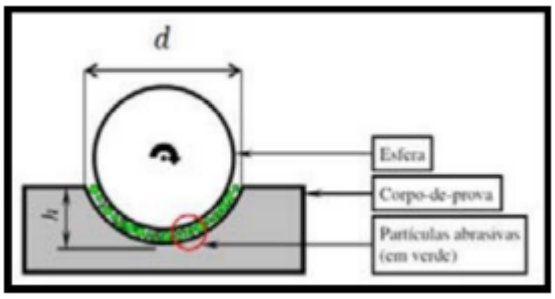
Há três modos de ensaios de desgaste micro-abrasivo, os quais são o riscamento, onde as partículas abrasivas deslisam sobre o corpo de prova, e o rolamento, que acontece com a rotação das partículas abrasivas sobre o corpo. E o terceiro método é a mistura entre o método de rolamento e riscamento. Todos esses métodos de analise de desgaste possuem o mesmo intuito, desgastar o corpo de prova para que então seja feita uma analise microscópica (OLIVEIRA, 2015).

Considerando as duas superfícies, a esfera rotativa em movimento e o corpo de prova, no desgaste abrasivo por riscamento, as partículas abrasivas ficam encrustadas em uma das superfícies, onde elas podem somente deslizar sobre o corpo de prova. Já no desgaste abrasivo por rolamento, as partículas ficam livre para rolar entre as superfícies.

2.3.19 Taxa de Desgaste Gerada

A esfera rotativa gera desgaste no corpo de prova do tipo cratera e as grandezas geométricas podem ser utilizadas para o cálculo do desgaste causado. Onde [d] representa o diâmetro da cratera, [h] a profundidade do desgaste e [v] o volume de material removido, como apresenta a Figura 10.

Figura 10: Desgaste Abrasivo a partir de grandezas geométricas



Fonte: (OLIVEIRA, 2015)

O diâmetro da cratera é medido a partir de um microscópico ótico. Já o volume de material retirado [v] e a profundidade da cratera [h] são medidos a partir do diâmetro da cratera [d] e do raio da esfera de ensaio [R], como mostra as Equações 1 e 2.

$$h = \frac{d^2}{8.R} \tag{1}$$

$$V = \frac{\pi.d^4}{64.R} \tag{2}$$

onde, tanto o diâmetro da cratera [d], quanto o raio da esfera de ensaio [R] são utilizados em milímetros.

A distância de deslizamento [S] pode ser calculada pelo produto do comprimento da circunferência pela frequência de rotação da esfera [f], como mostra a equação a seguir:

$$S = 2.\pi.R.f \tag{3}$$

onde:

R: Raio da esfera de ensaio [mm];

f: É a frequência de rotação da esfera [rpm];

Em seguida, utiliza-se a Equação de Archard, para o cálculo do volume de material removido pelo desgaste [v]:

$$V = S.c.N \tag{4}$$

Sendo:

S: Distância de deslizamento [m];

c: Taxa de desgaste;

N: Força normal [N].

Tem-se que a taxa de desgaste é calculada pela seguinte equação:

$$Q = c.N \tag{5}$$

Isolando a taxa de desgaste [c] da Equação 4, e substituindo na Equação 5, tem-se que a Taxa de desgaste produzida pelo ensaio, a partir das grandezas geométricas é:

$$Q = \frac{V}{S} \tag{6}$$

2.3.20 Ensaios Relacionados

Em 2011, (SCHOPF; BRESSAN, 2011), realizou um ensaio de desgaste Pino-Disco, onde bastões de aço ferramenta foram mantidos firme, enquanto um disco abrasivo, de carbeto silício, o qual possui alta resistência ao desgaste, girava em contato com a extremidade do bastão, que era plana e circular, com o objetivo de maximizar a área de contato com o disco. Durante os ensaios, utilizou-se uma velocidade de 0,45 m/s e uma carga aplicada ao bastão, de 5N. Para fixar o bastão e impedir sua vibração, durante os ensaios, o pino foi preso por meio de um batente, que além de fixa-lo, permitia sua regulagem de altura. Durante os ensaios, era medida a perda de massa do bastão, através de uma balança analítica de precisão 0,1 mg, à cada 300 metros, em um percurso total de 3000 metros. Com as medidas da perda de massa, eles calcularam a perda de volume, dividindo a perda de massa pela densidade do aço ferramenta utilizado. Para o cálculo da taxa de desgaste dos aços ferramentas,

utilizaram-se da equação de Archad, o qual utiliza-se da razão entre o volume de material retirado, à cada ensaio, pela distância percorrida pelo pino. Os aços sintetizados pela metalurgia do pó foram: Crucible CPM 3V, CPM 9V, CPM M4, Bohler K190 e Sinter 30, e os aços ferramentas convencionais, utilizados nos ensaios, foram: AISI A2, AISI H13, Bohler W360, Bohler K360. A seguir, na Figura 11, tem-se a dureza Vickers, com carga de 50N, e a microdureza dos aços utilizados para os ensaios.

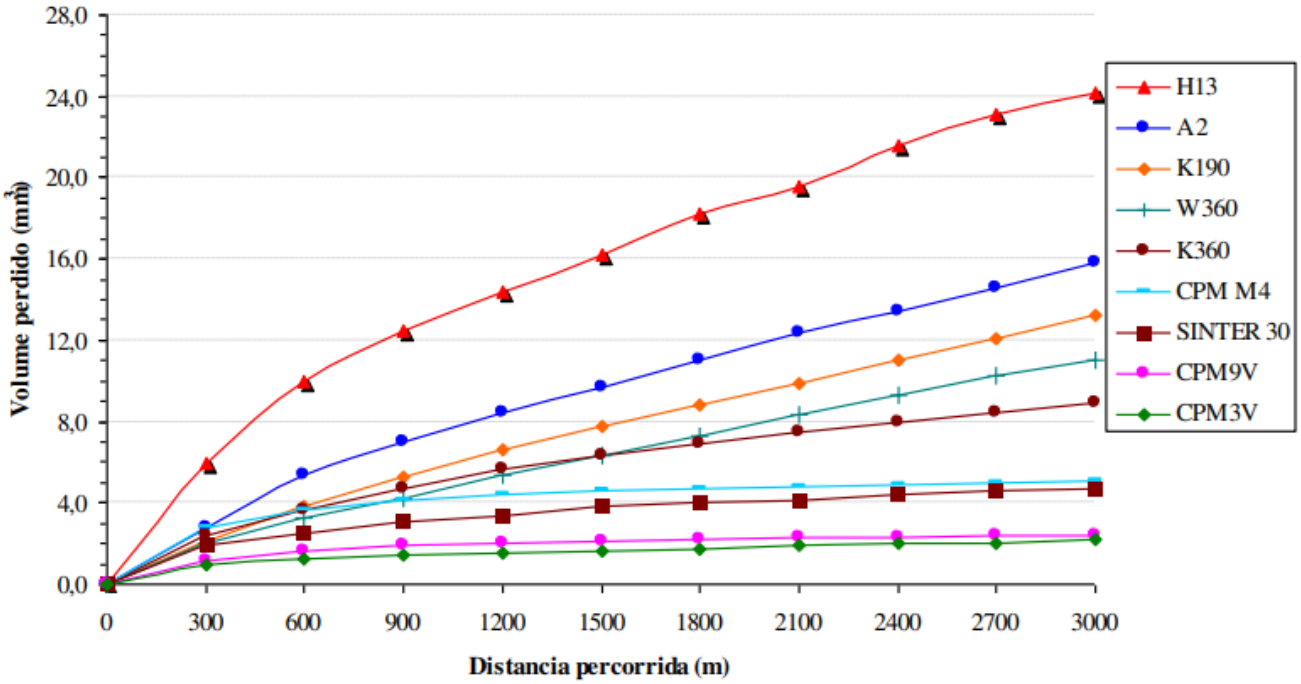
Figura 11: Dureza Vickers e microdureza dos aços utilizados

Aço	Dureza Vickers (HV)	Microdureza (mHV) 1000 g
K190 Microclean	813	814
K360 Isodur	785	765
W360 Isobloc	617	809
AISI A2	756	821
AISI H13	618	687
Sinter 30	797	1091
Crucible CPM 3V	666	723
Crucible CPM 9V	682	727
Crucible CPM M4	688	881

Fonte: (BRESSAN; SCHOPF, 2011)

Em seguida, correlacionaram o volume perdido, com a distância percorrida, para cada um dos aços ferramentas utilizados, através de um gráfico, o qual ilustra a Figura 12, onde o resultado é calculado a partir da média de três amostras de cada aço.

Figura 12: Volume Perdido em Função da Distância



Fonte: (BRESSAN; SCHOPF, 2011)

Ao analisar o gráfico, os pesquisadores, concluíram que a taxa de desgaste seguiu um comportamento diferente, para dois grupos de aços ferramentas utilizados. De um modo geral, os aços sintetizados representaram o grupo com maior resistência ao desgaste, para maiores distâncias, obtendo um uma taxa de desgaste mais próxima de uma curva constante, com o aço CPM3V, obtendo a menor taxa $Q = 2,15.10^{-4} mm^3/m$. já o grupo dos aços ferramenta convencionais, apresentaram as maiores taxas de desgaste, sendo a maior taxa, representada pelo aço AISI H13, com $Q = 5,21.10^{-3} mm^3/m$. A pesquisa apontou que todos os aços obtiveram uma taxa de desgaste mais acentuada nos primeiros 600 metros (primeiro estágio), devido à superfície do disco apresentar grãos de carbeto de silício mais agudas, no início dos ensaios, os quais, iam se quebrando com o aumento da distância.

Em um outro trabalho, publicado em 2022, por (OLIVEIRA, 2022), realizou-se um ensaio Pino-Disco, utilizando pinos e discos feitos de aço SAE 1045, onde o pino apresentava diâmetro de 3mm e comprimento de 30mm, os quais não eram reaproveitados em outros ensaios, para evitar contaminação. O disco utilizado possuía diâmetro de 31,5mm e altura de 8mm, os quais, ambos, os discos e os pinos passaram por retificação, antes dos ensaios. Para os ensaios utilizaram, como padrão, uma carga de 50N, velocidade de 0,42 m/s, com duração de 10 minutos, representando uma distância de deslizamento de 252 metros, em cada ensaio. Após os ensaios com lubrificante sintético API SL 5W-30, reproduziu-se o mesmo ensaio à seco, sem a utilização de lubrificante. Após os ensaios, os autores do trabalho, observaram que a utilização do óleo lubrificante, reduziu o desgaste propagado, na ordem de 250 vezes, em comparação com os ensaios à seco, indicando que a utilização de óleos lubrificantes, reduzem drasticamente a geração de desgaste, principalmente, quando se trata de redução de atrito.

Em 2005, foi apresentado, no Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, um

trabalho sobre a redução da viscosidade de óleos lubrificantes minerais e sintéticos, após a sua degradação, com o uso. Nesse trabalho, utilizou-se um óleo mineral, com 7500 km de uso, 40W, aditivado com antioxidante, antiespumante, anticorrosivo e detergentes. Já o óleo sintético usado é um 10W40, o qual é aditivado com antidesgaste, antioxidante, inibidores de ferrugem e aumentadores de índices de viscosidade, possuindo classificação SAE 10W40 (AZEVEDO; CARVALHO; FONSECA, 2005a).

Por meio de um viscosímetro, determinou-se a viscosidade desses óleos usados, e comparou-se com os valores de viscosidade, quando novos, conforme apresenta a Tabela 4, a seguir.

Tabela 4: Relação entre Quilometragem e Viscosidade de Óleos Lubrificantes

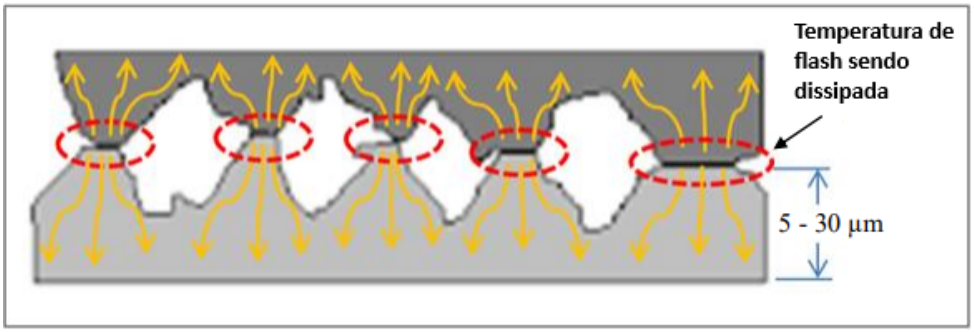
Óleo lubrificante	**Quilometragem (Km)**	**Viscosidade (cP)**
Mineral	0	267,83
Mineral	7500	245,25
Sintético	0	187,83
Sintético	15000	149,33

Fonte: (AZEVEDO; CARVALHO; FONSECA, 2005a)

Os pesquisadores observaram que a viscosidade dos óleos, após os uso, reduziram em 9 e 21%, para os óleos mineral e sintético, respectivamente. Tal comportamento foi atribuído à degradação do óleo, durante o uso, por meio da cisão de cadeias químicas, o qual levou à redução da viscosidade dos mesmos. Em um outro estudo realizado pelo mesmo autor, com a utilização dos mesmos óleos, concluiu-se que os óleos sintéticos, possuem uma melhor estabilidade térmica que o óleo mineral, devido à composição química e estrutura molecular controlada e isenta de contaminantes, dos óleos sintéticos (AZEVEDO; CARVALHO; FONSECA, 2005b).

(THURESSON, 2000), em sua tese de mestrado, no ano 2000, Thuresson, realiza análises sobre o calor gerado entre as interfaces, através da temperatura de flash. Segundo o autor, a temperatura de flash atua nos picos, em regiões microscópicas, das asperezas das superfícies, onde, devido à minúscula área de atuação, a energia de atrito é dissipada nesses pontos microscópicos, elevando a temperatura de forma rápida e extrema. Conforme o estudo, o autor descreve a temperatura de flash, como a soma da temperatura do material e o aumento rápido de temperatura causado pelo atrito. O autor destaca, através de modelos matemáticos, que a temperatura de flash de dissipa tão rapidamente, que somente a camada superficial dos materiais, é afetada, podendo estar submetidas à ataques químicos. Segundo à pesquisa, se a temperatura de flash atinge o ponto de amolecimento do material, ocorre a ruptura do filme protetor, e em altas velocidades de deslizamento, a temperatura de flash pode causar a oxidação térmica instantânea, de modo que o metal reaja com o oxigênio, presente no ar, formando óxidos frágeis, os quais são facilmente removidos, através do atrito. A Figura 13, abaixo, apresenta uma ilustração de como ocorrem as dissipações de calor, através da temperatura de flash, na microestrutura superficial do metal.

Figura 13: Pontos de dissipação da temperatura de flash



Fonte: Adaptado de (THURESSON, 2000)

Ao contrário do que se espera, no atrito entre superfícies metálicas, velocidades baixas de deslocamento de superfícies, em contato, podem gerar altas temperaturas de flash. De acordo com o artigo ”Influence of flash temperatures on the tribological behaviour in low-speed sliding: a review”, de (KALIN, 2004), é um erro ignorar os fatores de temperatura, em ensaios de baixa velocidade, pois a temperatura de flash, é um impulsionador de oxidações químicas e quebra do filme protetor, nos óleos lubrificantes, pois as reações tribo-químicas ocorrem através de efeitos mecânicos e térmicos, simultaneamente, mesmo sob baixas velocidades de deslizamento, onde se espera que as temperaturas sejam baixas. Pois a temperatura de flash, permite um aumento extremo de temperatura, nas asperezas microscópicas, ponto a ponto, na superfície, proporcionando reações tribo-químicas e transformações de fase. Em velocidades baixas de contato entre superfícies, normalmente, assume-se que não há o papel da temperatura afetando o processo, entretanto há evidencias de transformação de fase em experimentos de baixa velocidade. Uma possibilidade de identificação da ocorrência de transformação de fase, através das temperaturas de flash, é analisar a microestrutura formada, e correlaciona-las com a temperatura necessária para tal mudança, onde a dissolução química de carbonetos, na superfície do material, promovem a crença de efeitos térmicos, originados pelo aquecimento por atrito. Para esse experimento, o autor realizou testes de contato entre o aço DIN 100Cr6 e cerâmica de nitreto de silício, através de movimentos de deslizamento alternado (fretting), em baixa velocidade, como 6,7 mm/s, em ambiente seco e sob lubrificação de óleo mineral base, onde confirmou-se que o calor gerado, foi suficiente para causar a ruptura das cadeias de carbono do óleo lubrificante, os quais ocorrem em 400℃, e posteriormente a difusão do metal. Uma análise feita por espectrometria de Elétrons Auger (AES), confirmou a presença de mais de 10% em peso de carbono na zona superficial do aço, onde o único fornecedor possível para essa ocorrência, foi o óleo mineral. Entretanto, para que o carbono do óleo pudesse penetrar no aço dessa maneira, é preciso que a temperatura seja suficiente para quebrar as ligações C-C do lubrificante, o qual ocorre por volta de 400℃, o qual permitiu a dissolução dos carbonetos de ferro, na matriz do aço.

Para a avaliação do desempenho de um fluido de corte, utilizou-se como base o estudo conduzido por pesquisadores que empregaram um ensaio de deslizamento do tipo pino sobre disco em um tribômetro para simular condições de usinagem. O fluido de corte analisado foi o óleo vegetal reciclado tratado (TRVO, do inglês *Treated Recycled Vegetable Oil*), desenvolvido a partir de óleo de palma de descarte submetido a

processos de filtragem e tratamento com carvão ativado.

O experimento consistiu em pressionar um pino estático contra a superfície de um disco rotativo sob uma carga normal constante de 20 N e velocidade de rotação de 1000 rpm, durante um período contínuo de 60 minutos. O par de contato foi composto por um pino de carboneto de tungstênio sem revestimento e um disco de aço doce, materiais selecionados para representar a interface entre a ferramenta e a peça em processos de fresamento, sendo o lubrificante aplicado via sistema de Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL).

O comportamento da taxa de desgaste ao longo do tempo apresentou três estágios distintos, motivados por fenômenos físicos específicos na interface de contato: a fase inicial de ajuste de superfície, caracterizada por uma taxa de desgaste elevada que declina rapidamente devido ao ajuste geométrico e remoção de irregularidades (amaciamento); o estado estacionário, onde a taxa de desgaste se estabiliza devido à formação de uma película estável de fluido que atua como barreira de sacrifício e dissipa o calor; e a fase final de desgaste severo. Nesta última etapa, verifica-se um aumento abrupto na taxa de desgaste provocado pela degradação da película lubrificante e pelo aumento da rugosidade superficial do disco em 30,2%, levando ao rompimento do filme de óleo. Adicionalmente, o fenômeno de encruamento no disco de aço elevou sua microdureza de 125,08 para 130,03 HV, gerando uma superfície mais agressiva que, somada à fadiga mecânica acumulada, acelerou a remoção de material na interface, conforme descrito por (ZULKIFLI et al., 2025). Já para (SHIREESHA et al., 2024), é possível que haja duas situações em ensaios de desgaste pin-on-disc, para distâncias maiores de deslizamento. Uma delas, é que o coeficiente de atrito, permanece constante, mantendo a taxa de desgaste, constante, ao longo do tempo, após o período de amaciamento -período, onde as asperezas das superfícies foram reduzidas-. E a outra situação, é que ao longo dos ensaios, se as superfícies ficarem muito lisas, pode afetar na capacidade de lubrificação, ou se novas asperezas se formarem, podem acarretar no aumento do atrito, novamente. Para (NALINI, 2022), durante ensaios de desgaste, podem ocorrer endurecimento, formação de óxidos, fissuras superficiais, transformações de fase e transferência de material de uma superfície para outra, alterando a rugosidade da superfície, por meio de picos e vales de várias amplitudes e espaçamentos. Essas mudanças influenciam diretamente no comportamento tribológico dos materiais, devido à alterações na intensidade do atrito. O autor tirou essas conclusões ao realizar ensaios de pino sobre disco, utilizando discos de aço AISI 4140 de 5 mm de espessura e 75 mm de diâmetro, atritando contra pinos de três materiais diferentes, sendo eles: liga de cobre ASTM C10200, latão ASTM C36000 e liga de alumínio EN AW-6082-T6.

2.4 Fluido de corte

Durante o corte, há o envolvimento de uma grande quantidade de calor, devido à energia necessária para a retirada de material e também, devido ao atrito ferramenta-peça e cavaco-ferramenta. Esse calor gerado precisa ser removido da ferramenta e da peça com o intuito de minimizar o desgaste da ferramenta, evitando a dilatação térmica da peça - para que seja possível obter tolerâncias mais precisas -, e o dano térmico da estrutura superficial da peça. Tal calor, pode ser reduzido com a atenuação do coeficiente de atrito, com isso, não somente a geração de calor é diminuída, como também os esforços e a potência de corte. Com o objetivo de reduzir a geração de calor, pro-

movida pelo atrito, utiliza-se fluido de corte com capacidade lubrificante. Mesmo com toda essa atenção para a redução da geração de calor na usinagem, o calor continua sendo produzido, seja em maior ou menor quantidade, dependendo das condições da usinagem, como, por exemplo, o material da peça e da ferramenta, assim, além de reduzir o atrito, o fluido de corte precisa, também, ter a função de refrigeração do sistema (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014). É importante conhecer o processo que se deseja realizar, assim como o fluido de corte escolhido para tal, pois, em média, a utilização do fluido de corte, representa um gasto de aproximadamente 17%, no processo de manufatura (FIGLIUOLO et al., 2019), o qual é um valor expressivo ao se comparar com o custo com as ferramentas de corte, que correspondem, em média, de 2-4%.

Além das funções de refrigeração e lubrificação, às vezes é necessário que o fluido de corte tenha outras capacidades, como:

a) Prevenção contra soldagem cavaco-ferramenta, onde é bastante necessária quando o material a ser cortado possui uma pré-disposição à formação de aresta postiça de corte e as condições de corte contribuam para que isso ocorra, como baixas temperaturas de corte.

b) Retirada do cavaco da região de corte, em que em algumas operações de usinagem, a única forma de retirada de cavaco é através do fluxo de fluido de corte. Para que isso ocorra, esse fluxo de fluido de corte precisa ser em alta pressão e baixa viscosidade e o cavaco formado dever ser de pequena dimensão.

c) Proteção contra corrosão.

d) Redução da dilatação térmica, com o objetivo de se obter tolerâncias mais apertadas.

Mesmo com todas essas funções, os objetivos principais da utilização do fluido de corte, são a lubrificação e a refrigeração.

2.4.1 Fluido de Corte Como Refrigerante

Para que um fluido de corte tenha capacidade refrigerante, com o objetivo de retirar calor da peça, da ferramenta e da região de corte, é necessário que tal fluido tenha alguns requisitos, como:

- Baixa viscosidade, para que o fluido consiga fluir facilmente;
- Capacidade de envolver o metal, para se conseguir um bom contato térmico;
- Alto calor específico, para que consiga retirar, com facilidade, o calor do sistema peça-ferramenta;
- Alta condutividade térmica, com o intuito de transferir a energia térmica do sistema para o ambiente externo.

Em alguns casos, o tipo de material da ferramenta possui elevada resistência ao desgaste, não dependendo de fluido de corte para resfria-lo. Mesmo nesses casos,

um fluido refrigerante é utilizado para que a peça não sofra nenhum dano. A peça precisa ser protegida mesmo nesses casos, pois se deseja alto grau de qualidade dimensional, geométrico e de superfície, de modo a não haver dano térmico à estrutura superficial da peça (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014).

2.4.2 Fluido de Corte Como Lubrificante

O fator de lubrificação permite a atenuação do coeficiente de atrito gerado entre cavaco-ferramenta e ferramenta-peça, facilitando a saída do cavaco, reduzindo a força e a potência de corte necessária e também reduzindo a temperatura do sistema. A penetração do fluido de corte, entre as superfícies em contato, se da pelo fenômeno de capilaridade, com o auxílio da vibração entre ferramenta, peça e cavaco. Caso o fluido não consiga alcançar a região de corte, ele não conseguirá ter o efeito lubrificante. Por este motivo, a lubrificação pode ficar deficiente quando se trata de velocidades de corte muito elevadas, pois para que o fluido consiga atingir a região de corte, é necessário que o mesmo seja seja impulsionado sob altas pressões, e apara que isso ocorra, é preciso que o fluido não vaporize quando submetido à altas pressões (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014).

Para que um fluido tenha uma boa capacidade de lubrificação, é necessário que ele tenha algumas características, como:

- Resistência à altas pressões e temperaturas, para não evaporar;
- Boas propriedades anti-fricção e anti-soldantes, para redução do atrito e capacidade de soldagem;
- Viscosidade adequada, ou seja, baixa o suficiente para que consiga fácil circulação e alta o suficiente para que haja uma boa aderência do fluido com as superfícies da ferramenta.

As propriedades citadas acima, garantem ao fluido de corte uma boa lubrificação e refrigeração, no entanto, há outras propriedades que também são exigidas de um fluido de corte, como:

- Ausência de odores desagradáveis;
- Não ser corrosivo, e apresentar proteção à peça e à ferramenta contra corrosão.
- O fluido de corte não deve causar danos à pele humana ou qualquer outro risco à saúde

2.4.3 Classificação Dos Fluidos de Corte

Há diversos tipos de fluido de corte, os quais podem ser classificados como sólidos, gasosos, aquosos e óleos:

2.4.3.1 Sólidos

Os fluidos de corte sólidos, como exemplo, a grafita e o bissulfeto de molibdêdeo, são aplicados na região de saída da ferramenta, com o único objetivo de atenuar o coeficiente de atrito gerado entre a ferramenta e o cavaco. A utilização desse tipo de fluido possui uma desvantagem, é preciso fazer a paralisação da operação para a reaplicação do produto, devido à isso, seu uso tem sido restrito (MACHADO et al., 2015).

2.4.3.2 Gasosos

Ar: Em determinados cortes à seco, o ar é utilizado com o intuito de remover o cavaco da região de corte e para fornecer ação refrigerante (baixa capacidade refrigerante à temperatura ambiente). Esse tipo de fluido de corte é mais utilizado na usinagem de ferro fundido cinzento, pois ao utilizar fluido de corte liquido, nesse tipo de material, os minúsculos cavacos formados são conduzidos até as partes de atrito da máquina-ferramenta, danificando-os (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014).

Como foi visto anteriormente, o ar à temperatura ambiente, tem como principal função, a remoção de cavaco, e não possui uma capacidade refrigerante significativa em temperatura ambiente. Entretanto, é possível fazer a utilização de fluidos gasosos, resfriados à temperaturas negativas e sob pressão, como por exemplo: o ar, o gás carbônico, e o nitrogênio. É relatado que a utilização de fluidos de corte gasosos, em baixas temperaturas, proporcionam um aumento substancial da vida útil da ferramenta, entretanto, a utilização de fluidos de corte gasosos, na indústria, ainda é inviável (MACHADO et al., 2015).

2.4.3.3 Aquosos

Água: A água foi o primeiro fluido de corte a ser utilizado, sua ação é unicamente refrigerante. Possui vantagens como: fácil acesso, baixo custo e baixa viscosidade. Entretanto, possui algumas desvantagens como: provocar corrosão em materiais ferrosos e baixa capacidade umectante (molhabilidade). Atualmente, este tipo de fluido de corte não é utilizado com frequência na indústria.

Emulsões: Como o próprio nome diz, são emulsões de óleo em água. Esse tipo de fluido de corte é compostos por uma pequena porcentagem de óleo emulsionável concentrado, dispersos em pequenas gotículas de água. Os emulsionadores possuem a função de facilitar a dispersão do óleo na água. Não se trata de uma solução de óleo em água, pois água e óleo não se misturam, mas água com partículas de óleo dispersas em seu interior.

Por serem compostos essencialmente por água, com uma pequena parcela de óleo, variando de 1 - 20%, possuem um poder refrigerante bem elevado. A presença de óleo mineral, emulsificadores e inibidores da corrosão contornam as desvantagens de se utilizar água como fluido de corte, as quais são a sua ação corrosiva e sua baixa capacidade de umedecimento dos metais.

As emulsões são utilizadas com o principal objetivo de refrigeração da ferramenta e da peça, em ocasiões onde a necessidade de lubrificação não são críticas. Devido à isso, a utilização das emulsões são feitas em usinagens onde a retirada de material

não é muito elevada, ou seja, em usinagens com baixo e médio avanço e profundidade de corte, e velocidades de corte média e alta.

Em alguns casos, são adicionados aditivos do tipo EP (extrema pressão), os quais possuem substâncias com enxofre e cloro, que agregam maior resistência em operações mais agressivas de corte, ou seja, estes óleos possuem maior resistência à vaporização, quando submetidos à altas pressões. Esses óleos emulsionáveis, com aditivos, do tipo EP, são utilizados quando se precisa de uma maior capacidade de lubrificação, tendo em vista que, os óleos emulsionáveis comuns, não conseguem suprir essa necessidade (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014).

2.4.3.4 Óleos

Em operações de usinagem, onde o calor gerado pelo atrito é muito elevado, há maior vantagem em se utilizar óleos puros ao invés de emulsões. Os óleos puros possuem metade do calor específico da água, devido à isso, possuem menor capacidade de refrigeração, entretanto, sua capacidade de lubrificação é superior às emulsões, oque resulta em uma menor quantidade de calor gerado pelo atrito.

Quanto menor for a viscosidade de um óleo, maior será sua capacidade de refrigeração, por esse motivo, são utilizados óleos leves em usinagens à altas velocidades, onde a dissipação do calor precisa ser rápida. Por outro lado, em operações onde a velocidade de corte é menor e o avanço e a profundidade são maiores, utilizam-se óleos mais viscosos, pois há uma alta taxa de remoção de cavaco, e consequentemente, uma maior geração de calor por atrito, devido à isso, é mais interessante utilizar um óleo com maior capacidade lubrificante (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014).

Os óleos puros são divididos em óleos minerais puros, óleos graxos, óleos compostos e óleos EP:

Óleos Minerais Puros: São frequentemente utilizados na usinagem de materiais, tais como: aço baixo carbono, latão, bronze e ligas leves. Esses óleos são mais acessíveis e menos propensos à oxidação em relação aos óleos graxos e aos óleos compostos (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014).

A utilização desse tipo de óleo tem perdido espaço, nos últimos anos, devido ao seu alto custo agregado, ao seu baixo ponto de fulgor (aumento do risco de incêndios), baixa eficiência sob altas velocidades de corte, baixo poder refrigerante, além de oferecer riscos à saúde do operador. À esses óleos, podem ser adicionados aditivos à base de cloro ou enxofre, os quais podem agregar resistência a vaporização sob altas pressões, ou também, aditivos à base de fósforo, o qual garante características anti-desgastante (MACHADO et al., 2015).

Além disso, esse tipo de óleo possui uma grande resistência à oxidação e garante uma viscosidade constante sob várias faixas de temperaturas.

Óleos Graxos: São óleos de base vegetal e animal. Conseguem ”molhar”o sistema peça-ferramenta com facilidade. Possuem boa ação lubrificante, entretanto, possuem baixas características anti-soldantes. São capazes de proporcionar a obtenção de peças com bom acabamento e possuem uma capacidade de refrigeração média. Os óleos graxos vão se tornando cada vez mais viscosos, e se deterioram, com o passar do tempo, além de possuírem um alto custo. Por esses motivos, estão sendo substituídos, frequentemente, pelos óleos compostos e óleos EP’s (DINIZ; MARCON-

DES; COPPINI, 2014).

Óleos Compostos: Os óleos compostos são uma mistura entre os óleos minerais e os óleos graxos, possuindo as vantagens dos óleos graxos e não se deterioram, ou seja, não vão se tornando mais viscosos com o tempo. Outra vantagem desse tipo de óleo, é a possibilidade de ajuste de viscosidade pelo óleo mineral. A porcentagem de óleo graxo utilizada é de 10 - 30% e seu uso é recomendado na usinagem de materiais como cobre e ligas de cobre, e em procedimentos como fresamento e furação (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014).

Óleos de Extrema Pressão [EP]: São óleos, os quais possuem, em sua composição, elementos responsáveis por faze-los suportar elevadas pressões sem que sofram evaporação. Tal propriedade é pré-requisito necessário em operações que envolvam altas velocidades e profundidades de usinagem. Os aditivos, que normalmente são utilizados em óleos de extrema pressão, são o enxofre e o cloro, os quais garantem estabilidade de fase aos óleos. De acordo com a composição, esses óleos podem ser classificados em ativos ou inativos. Os ativos, normalmente contêm enxofre em sua composição, e reagem quimicamente com os materiais envolvidos, com o intuito de aguentar pressões elevadas e fixar-se nas superfícies em contato, evitando que haja soldagem entre superfícies. Materiais como o cobre e suas ligas, não podem ser trabalhadas na presença de óleos EP's ativos, pois são corroídos pelo enxofre (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014).

2.4.4 Seleção do Fluido de Corte

Fazer a seleção de fluido de corte, de modo adequado, é difícil, pois há uma imensa gama de produtos disponíveis no mercado. O seu custo é alto, então a escolha precisa ser viável economicamente, ou seja, a escolha do fluido ideal, deve suprir as necessidades exigidas de modo a justificar o seu preço (MACHADO et al., 2015).

Para fazer a seleção do fluido de corte, leva-se em consideração o material da peça, as condições de usinagem e o material da ferramenta.

2.4.5 Fluido de Corte e o Meio Ambiente

Um dos principais processos de manufatura, é a usinagem, onde o uso de fluido de corte é bem comum, devido às suas ações benéficas, quando se trata de condições tribológicas.

No entanto, a utilização de fluido de corte, na indústria, contribui para efeitos nocivos, tanto ao meio-ambiente, quanto à saúde do operador. Com isso, a atenção à seleção eficiente do fluido de corte esta ganhando espaço, com o intuito de garantir menores impactos ambientais.

As restrições resultantes de novas leis sobre o tema, obrigam a industria a desenvolver novas tecnologias e alternativas sustentáveis. Isso se torna um desafio para os pesquisadores e ao mesmo tempo torna a indústria-verde um fator de competitividade desse ramo.

O uso do fluido de corte, por parte da indústria, faz com que a mesma seja agressora do meio ambiente, podendo atingir, também, o ambiente de trabalho. Os impactos causados pela utilização de fluido de corte, são devidos aos seus efeitos nocivos à atmosfera, ao solo e aos recursos hídricos.

Após serem utilizados, os fluidos de corte podem ser dispostos pela mesma companhia que os produziu. No entanto, dependendo do modo como é feito, poderá po-

derá causar efeitos nocivos ao solo, à água e ao ar. É preciso estar ciente de que, durante a usinagem, a composição do fluido de corte se altera, alterando também, sua capacidade de agredir o meio natural.

O problema não está somente no descaso ou descuido da disposição do fluido de corte, como também no próprio processo de manufatura, com a sua perda durante a vaporização na usinagem, na saída de cavaco e também nos vazamentos. Um ponto importante, é que cerca de 30% do fluido de corte utilizado é perdido, a cada ano, por estes meios, evidenciando a importância de alternativas para o uso ou até mesmo a substituição do fluido de corte, para de obter um processo mais sustentável e econômico.

A utilização do fluido de corte nos processos de usinagem, faz com que os mesmos evaporem quando em contato com superfícies quentes, comprometendo o ar do ambiente de trabalho e ponto em risco a saúde de funcionários. Há evidencias de que a utilização do fluido de corte, por parte das empresas, promova um aumento da possibilidade de surgimento de câncer em diversos órgãos do corpo humano. Os constituintes químicos dos fluidos de corte podem variar de fluido a fluido, podendo conter agentes carcinogênicos, como a N-nitroamina.

Existem vários tipos de fluidos de corte e dentre eles, o que tem se mostrado mais agressivo à saúde humana, são os óleos integrais, já os óleos solúveis são os menos agressivos. Entretanto, devido ao baixo número de pesquisas envolvendo a utilização de fluidos de corte, não é possível dizer que todos os óleos solúveis estão livres de constituintes carcinogênicos(GOMES; ALVES, 2007).

2.4.5.1 Material da Peça

Na usinagem de materiais como cobre, bronze, latão e alumínio, não se pode utilizar fluidos de corte com água, devido à possibilidade de combustão, causada pela liberação de hidrogênio.

Para a usinagem do aço carbono, pode-se utilizar qualquer óleo, pois a escolha do fluido não é baseada no material da peça, e sim em outros fatores, como lubrificação e refrigeração, por exemplo. Já para o aço inoxidável, utiliza-se óleos do tipo EP, para dificultar o encrostamento do cavaco na ferramenta (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014).

2.4.5.2 Condições de Usinagem

Em condições severas de usinagem, como o desbaste, onde há um alto avanço e profundidade de usinagem, com baixa velocidade de corte, utiliza-se óleo puro, pois as forças de corte são elevadas e torna-se necessário uma boa lubrificação das partes em contato, para amenizar o atrito.

Para o caso de condições mais brandas de usinagem, ou seja, com velocidades de corte mais altas, é preferível a utilização de emulsões, onde a necessidade principal é de refrigeração (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014).

2.4.5.3 Operação de Usinagem

Em operações de retificação, onde a velocidade de corte é alta, a emulsão é o fluido mais utilizado, pois consegue suprir a lubrificação exigida nesses casos. Já

no caso de usinagens mais pesadas e lentas, como o mandrilamento - aumento de um furo já existente -, são preferíveis os óleos ativos e viscosos, pois, possuem boa capacidade de aderir à ferramenta.

No caso de furações profundas, utiliza-se o óleo mineral composto de baixa viscosidade, pois necessita-se de uma boa lubrificação, devido às grandes áreas em contato, que geram atrito, e também, é preciso que o fluido seja de baixa viscosidade, para que consiga retirar o cavaco (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014).

2.4.5.4 Material da Ferramenta

Materiais de ferramenta, como o aço rápido, não podem ser expostos à água, devido à corrosão, por causa disto, as emulsões que são utilizadas, nessa situação, devem possuir aditivos potentes contra ferrugem.

Ferramentas feitas de materiais cerâmicos, à base de óxidos, não utilizam fluidos de corte, para evitar variações de temperatura, as quais causam danos à esse tipo de material (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014).

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Todos os ensaios e preparações foram realizados no Bloco M1 - Materiais e processos de fabricação, na Unesp de Ilha Solteira - SP.

3.1 Materiais

3.1.1 Metal base, óleos lubrificantes e fluido de corte

O material utilizado como base, nos ensaios de desgaste, foi um bit de Aço WKE 42, de acordo com a Figura 5.

Figura 14: Bit de Aço WKE 42



Fonte: Próprio Autor

Cuja composição pode ser vista na Tabela 5, abaixo.

Tabela 5: Especificação e composição química do aço WKE 42.

Especificação do Material	Aço WKE 42
Dureza	64 – 66 HRC
Composição Química do Aço	
C	1,25
Si	0,36
Mn	0,32
Cr	3,93
Mo	3,82
P	0,026
S	0,001
W	9,12
V	3,00
Co	9,59
Cu	0,09

Fonte: Próprio Autor

Já os óleos lubrificantes usados, foram utilizados, o óleo mineral Escort - 20W50 e o óleo sintético T105- 5W30.

Em relação ao fluido de corte, utilizou-se o BIOSIN - F - SOLÚVEL, com uma solução de 10% (50 ml de óleo solúvel + 450ml de água). A especificação do fluido de corte mostra-se presente na Figura 15.

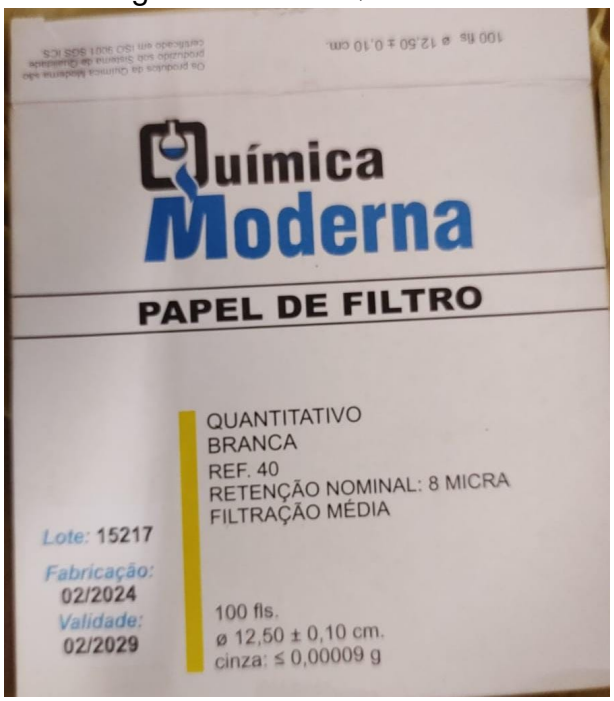
Figura 15: Especificação do fluido de corte



Fonte: Fabricante

Vale ressaltar, que os óleos lubrificantes usados, passaram por um processo de filtragem, antes de serem utilizados nos ensaios. Para a filtragem, foram utilizados filtros quantitativos, de retenção nominal de 8 micra. A Figura 16, apresenta o filtro utilizado e suas especificações.

Figura 16: Filtro Quantitativo



Fonte: Próprio Autor

3.1.2 Esfera AISI 52100

Foi utilizado uma esfera AISI 52100, com diâmetro de 25,35 mm, conforme apresenta a Figura 17, o qual tem a função de ser a esfera rotativa, que entra em contato com o bit de aço, durante os ensaios de desgaste.

Figura 17: Esfera AISI 52100



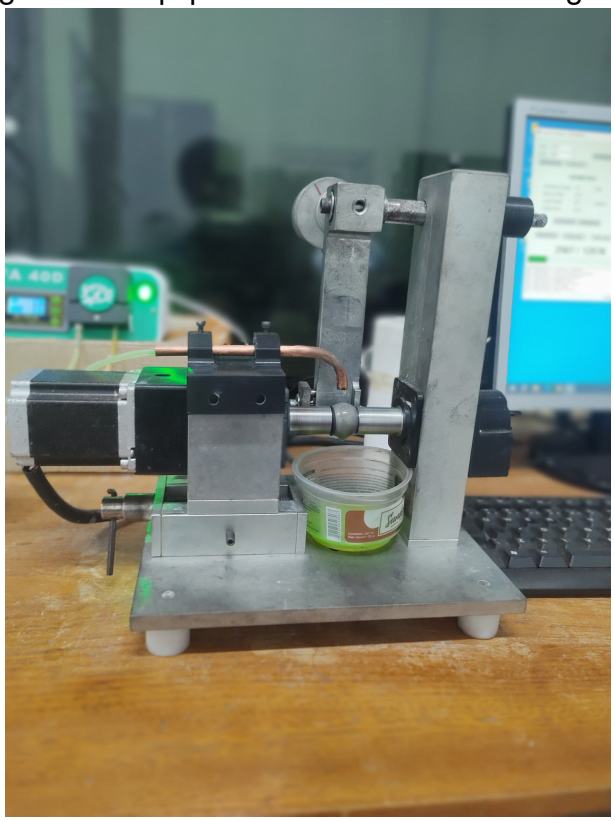
Fonte: Próprio Autor

3.2 Equipamentos

3.2.1 Máquina de ensaio de desgaste

Para a realização dos ensaios de desgaste, foi utilizado o equipamento de desgaste micro-abrasivo, por esfera rotativa, conforme a Figura 18, com uma esfera AISI 52100, com diâmetro de 25,35 mm.

Figura 18: Equipamento de ensaio de desgaste

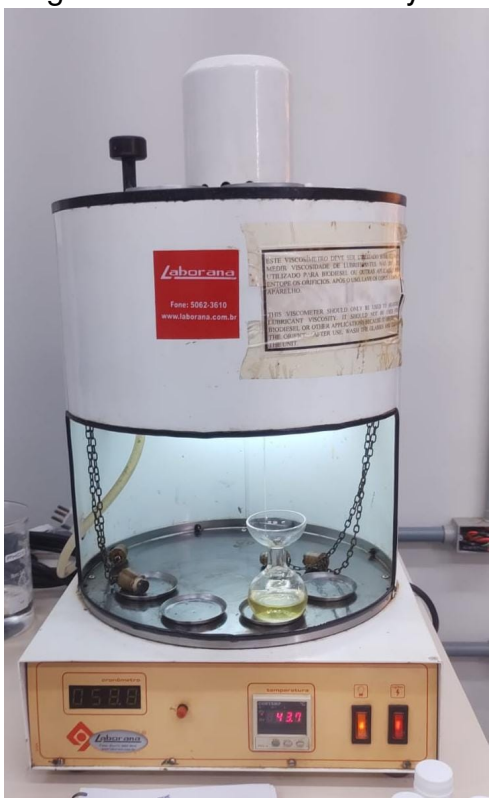


Fonte: Próprio Autor

3.2.2 Viscosímetro

Utilizou-se um viscosímetro Saybolt, para mensurar a viscosidade dos óleos mineral e sintético e também da solução preparada de fluido de corte. O viscosímetro, em questão, encontra-se representado pela Figura 19.

Figura 19: Viscosímetro Saybolt

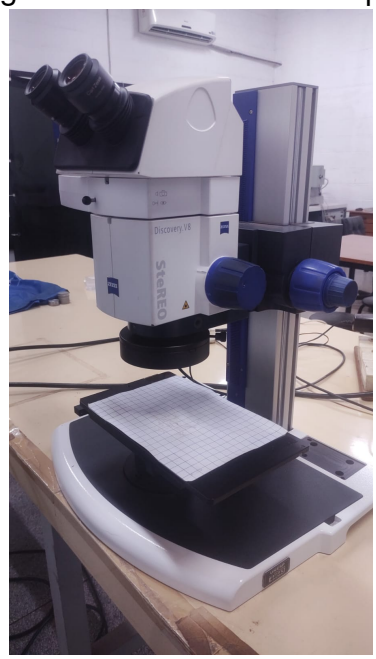


Fonte: Próprio Autor

3.2.3 Estereomicroscópio

Este é um estereomicroscópio ZEISS, modelo DISCOVERY V.8, com uma câmera AXIOCAM ERC5S, o qual foi utilizado para gerar imagens macrográficas das crateras formadas pelos ensaios de desgaste. A Figura 20 apresenta o modelo utilizado.

Figura 20: Estereomicroscópio



Fonte: Próprio Autor

Para o dimensionamento do tamanho das crateras, utilizou-se o diâmetro médio, através de uma esfera, colocada sobre as imagens do microscópio, de modo que englobassem a maior parte dos riscamentos. E com isso, utilizou-se o diâmetro médio dessa esfera para os cálculos seguintes.

3.2.4 Rugosímetro

Foi utilizado um rugosímetro, da marca Mitutoyo, modelo SJ-201P, para medir a rugosidade da esfera, que foi utilizada nos ensaios de desgaste. A Figura 21 apresenta uma imagem do aparelho utilizado.

Figura 21: Rugosímetro



Fonte: Próprio Autor

3.2.5 Bomba Dosadora

A bomba dosadora, utilizada, é de alta precisão e baixa taxa de fluxo, e foi utilizada para automatizar a lubrificação, tanto com óleos, quanto fluido de corte. A Figura 22, apresenta o equipamento dosador, utilizado.

Figura 22: Equipamento de dosagem de fluidos



Fonte: Próprio Autor

3.3 Métodos

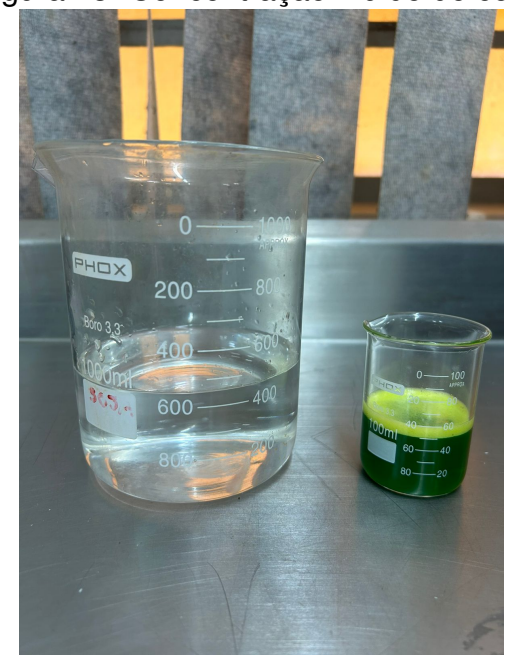
3.3.1 Preparação dos óleos e fluido de corte

Inicialmente, os óleos lubrificantes usados, passaram por um processo de filtragem, para retirar impurezas sólidas; a filtragem foi realizada, passando o óleo por um

filtro quantitativo (Figura 16), permitindo a retirada de possíveis fragmentos, presentes, anteriormente.

O fluido de corte, utilizado neste estudo, foi preparado com uma concentração de 10%, sendo 450 mL de água e 50 mL de óleo solúvel. Conforme a Figura 23, abaixo.

Figura 23: Concentração Fluido de corte



Fonte: Próprio Autor

3.3.2 Preparação da Esfera AISI 52100

A esfera AISI 52100 (Figura 17) foi mergulhada em uma solução com uma concentração de 20% de nital, por um minuto, e em seguida, limpada com um pano; esse procedimento foi realizado dez vezes. O banho de nital foi realizado com o intuito de gerar uma superfície rugosa. Após o término do banho de nital, a esfera deixou de ter 25,35 mm de diâmetro e passou a ter 25,31 mm, e também perdeu seu brilho, ficando com um aspecto opaco.

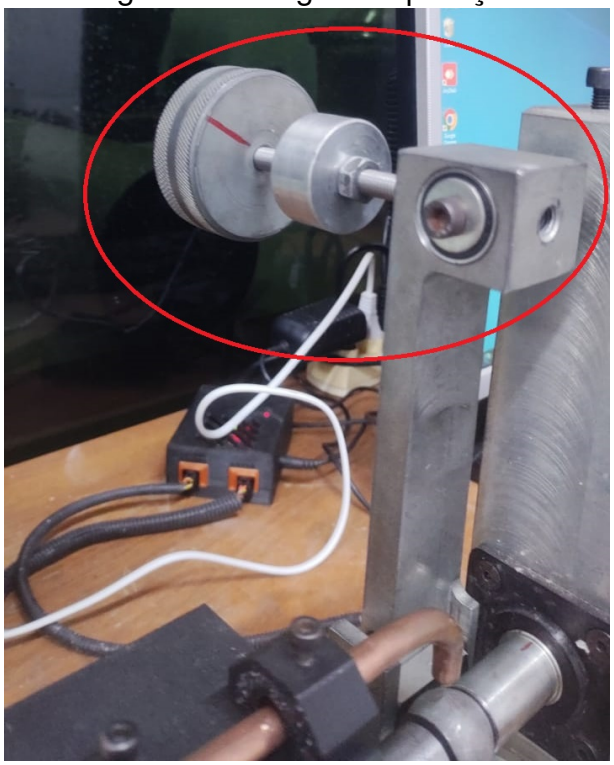
3.3.3 Preparação do Bit de Aço

O bit passou por um processo de lixamento, onde foi utilizado lixas d'água até a granulometria de 1500 grãos por polegada quadrada. Em seguida, o bit passou pela politriz metalográfica, para ser polido, onde no processo de polimento, foi utilizado alumina, como abrasivo. No fim do processo, o bit de aço apresentava uma superfície espelhada.

3.3.4 Preparação da Carga Aplicada

A força aplicada à esfera, e ao bit, é concedida por meio de cilindros acoplados à haste, por meio de um parafuso, os quais possuem a função de pesos-mortos. A Figura 24 destaca o sistema de aplicação de carga utilizado, no equipamento.

Figura 24: Carga de Aplicação



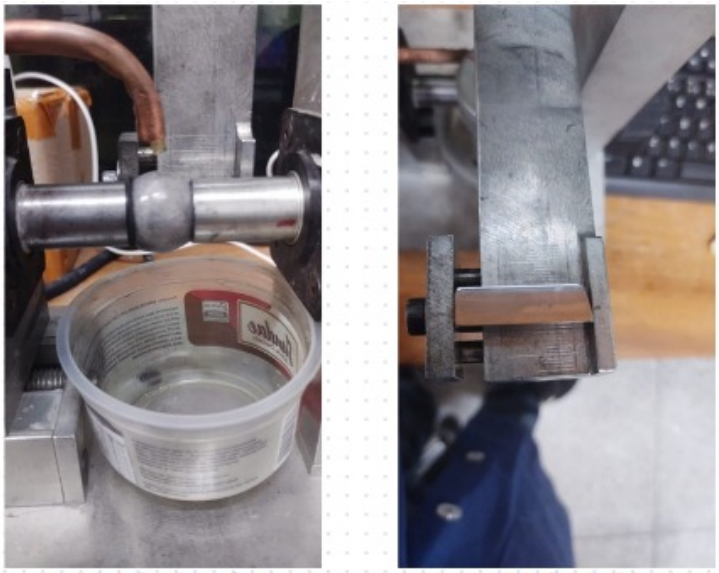
Fonte: Próprio Autor

Os pesos-mortos geram um torque na haste, que força o bit contra a esfera, em rotação. A força utilizada para todos os ensaios realizados nesse trabalho, foi de $5N$.

3.3.5 Preparação do Equipamento de Ensaio de Desgaste

O bit de aço foi submetido ao ensaio de desgaste, por esfera rotativa, utilizando-se o equipamento apresentado na Figura 18. Para esse processo, a esfera e o bit foram fixados ao equipamento de ensaio, como apresenta a Figura 25 A) e B).

Figura 25: Fixação da Esfera e do Bit de Aço



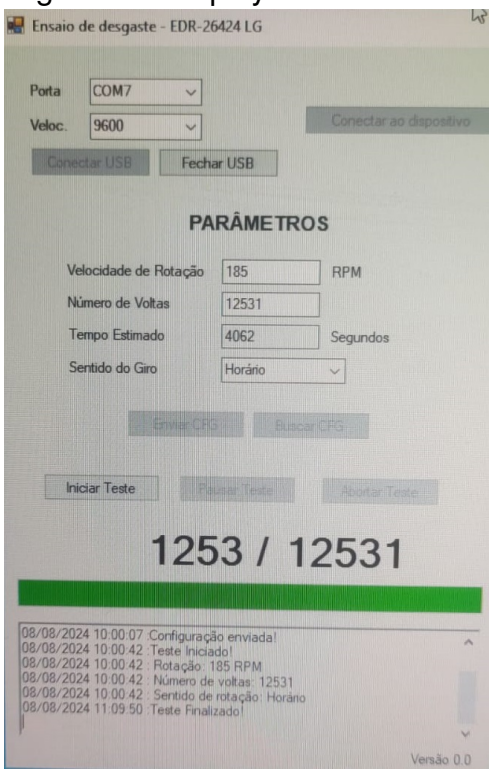
Fonte: Próprio Autor

Para cada fluido lubrificante, foram feitos ensaios de desgaste, que partiam de distâncias de 1000 metros, até 5000 metros, com uma rotação de 185 rpm. Os ensaios foram realizados com pausas a cada 1000 metros, e em cada pausa, a esfera era rotacionada, de modo que a linha de contato entre a esfera e o bit ficasse em uma posição ainda não utilizada.

3.3.6 Preparação dos Parâmetros de Ensaio

Para definir alguns dos parâmetros do ensaio, como velocidade de rotação, número de voltas e o sentido de giro, da esfera, foi necessário a utilização de um Software, para controle. A Figura 26, apresenta o display do software, utilizado nos ensaios.

Figura 26: Display de Parâmetros



Fonte: Próprio Autor

No software, é definido a velocidade de rotação, em RPM, e o sentido de giro da esfera, os quais, para todos os ensaios, ficaram fixados em 185 RPM, e sentido horário de rotação.

Outro parâmetro importante, que também é definido, é o número de voltas que a esfera irá dar. Para o cálculo do número de voltas, utilizou-se a seguinte equação:

$$R = \frac{P}{\pi.d} \tag{7}$$

Onde:

R: Número de voltas;
P: Distância a ser percorrida [mm];
d: Diâmetro da esfera[mm].

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Viscosidade

As medidas de viscosidade dos óleos, mineral e sintético, e também do fluido de corte, obtidas através do viscosímetro Saybolt [Figura 19], estão apresentadas, a seguir, na Tabela 6.

Tabela 6: Viscosidade dos Óleos e Fluido de Corte

Fluido	Viscosidade (cst)
Óleo Mineral	75,72
Óleo Sintético	49,59
Fluido de Corte	1,5

Fonte: Próprio Autor

Observa-se, na Tabela 6, que a viscosidade dos três fluidos, utilizados, são bem distintas, com uma grande diferença entre elas, fator que pode influenciar no desgaste gerado, em cada uma das situações. Onde um fluido mais viscoso possui um potencial maior de lubrificação, e um fluido menos viscoso, apresenta um potencial maior de refrigeração, os quais reduz os desgastes gerados pelo atrito e pela temperatura gerada, respectivamente.

Para contexto de comparação, a Tabela 7, a seguir, apresenta os valores das propriedades do óleo mineral 20W50 novo, contidas em sua ficha técnica.

Tabela 7: Características Físico-Químicas do Óleo Mineral SAE 20W50 novo

Propriedade	Unidade	Valor
Viscosidade Cinemática a $40°C$	cSt	$133,4$
Índice de Viscosidade (IV)	Adimensional	139
Ponto de Fulgor	$°C$	245

Fonte: Especificação Técnica

Analisando as especificações técnicas do óleo mineral, novo, para comparar com a viscosidade, após seu uso, o óleo mineral novo possui uma viscosidade de 133,4 cst, apresentando uma redução, após seu uso, de 43%.

A seguir, tem-se as características físico-químicas do óleo sintético, contidas em sua ficha técnica, apresentadas pela Tabela 8.

Fonte: Especificação Técnica

Ao analisar as especificações técnicas do óleo sintético 5W30, novo, para comparar com a viscosidade, após seu uso, o óleo sintético novo possui uma viscosidade de 69,25 cst, apresentando uma redução, após seu uso, de 28,4%.

Tabela 8: Características Físico-Químicas do Óleo Sintético SAE 5W30 novo

Propriedade	**Unidade**	**Valor**
Viscosidade Cinemática a 40	cSt	$69,25$
Índice de Viscosidade (IV)	Adimensional	171
Ponto de Ponto de Fulgor	$°C$	220

4.2 Rugosidade da Esfera

Com as medidas desses 30 pontos, calculou-se o valor médio e o desvio padrão para R_a, R_y, R_z e R_q, como apresenta a Tabela 9. Onde os valores das medidas, podem ser encontrados no APÊNDICE A.

Tabela 9: Valor Médio, Desvio Padrão e Variação

Parâmetro	**Média**	**Desvio Padrão**	**Variação**
Ra	1.218	0.253	20.8%
Ry	7.778	1.930	24.8%
Rz	7.778	1.930	24.8%
Rq	1.622	0.342	21.1%

Fonte: Próprio Autor

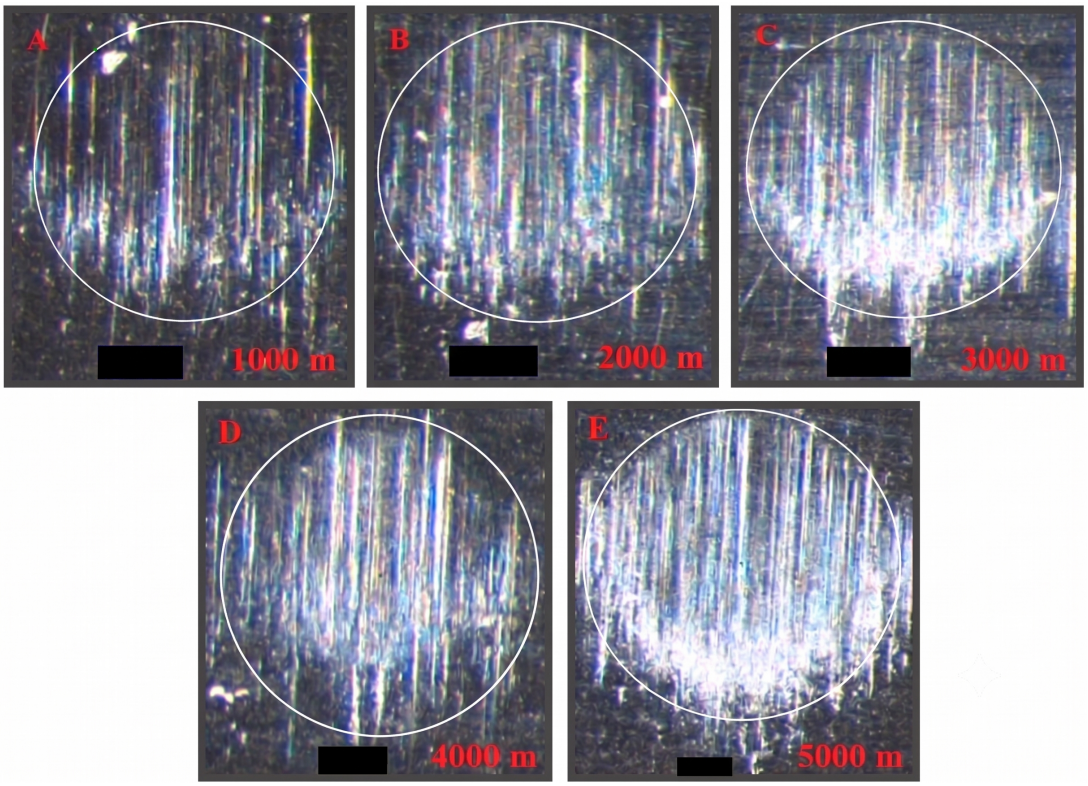
Ao observar a Tabela 9, tem-se que, a variação das medidas de rugosidade, nos diversos pontos da esfera, para R_a, R_y, R_z e R_q, estão entre $20-25\%$, indicando que há uma variação moderada, da rugosidade, nos 30 pontos, distintos, medidos. Ou seja, o tratamento químico na esfera, com nital, que tinha como objetivo, retirar a película superficial, fez com que a esfera apresenta uma rugosidade não uniforme.

4.3 Ensaios de Desgaste

4.3.1 Ensaio de Desgaste: Óleo Mineral

Os ensaios de desgaste, com a utilização do óleo mineral, resultaram em 5 imagens, os quais representam os desgastes sofridos pela amostra, partindo de 1000 metros até 5000 metros, da rotação da esfera. A Figura 27 A, B, C, D e E apresentam, respectivamente, os desgastes para as distâncias de 1000, 2000, 3000, 4000 e 5000 metros.

Figura 27: Desgaste para distâncias de 1000, 2000, 3000, 4000 e 5000 metros aplicando óleo mineral



Fonte: Próprio Autor

O óleo mineral tende a ter uma capacidade de refrigeração menor, pois sua viscosidade relativa é maior, fazendo com que haja um escoamento mais lento do fluido, induzindo há uma retirada de calor mais lenta. Outro fator relevante, é o tempo de deslocamento do fluido sobre a superfície, onde uma viscosidade maior, representa uma movimentação mais lenta do fluido, ou seja, uma menor troca. Entretanto, seu poder de lubrificação é maior, o que proporciona uma menor taxa de desgaste em operações de baixa velocidade e de maiores profundidade e avanços de usinagem, onde o fator principal de desgaste é o atrito envolvido.

Esse tipo de óleo possui uma variação maior de sua viscosidade, conforme o aumento de temperatura, devido ao seu índice de viscosidade ser, relativamente, menor, quando comparado ao índice de viscosidade agregado ao óleo sintético, fazendo com que, no início dos ensaios, quando a temperatura ainda é baixa, ele tenha uma viscosidade maior, em relação à quando é submetido à ensaios com maiores distâncias, onde há a presença de temperaturas maiores. Com isso, no início dos ensaios, o óleo mineral tem uma viscosidade maior, o que proporciona a ele, uma capacidade maior de lubrificação e um menor poder de refrigeração.

Já, no fim dos ensaios, devido à seu índice de viscosidade ser, relativamente, menor que o índice do óleo sintético, ele tem uma redução maior de sua viscosidade, conforme o aumento da temperatura, fazendo com que sua viscosidade diminua mais, com o ganho de temperatura, e com isso, proporcionando um maior poder de refrigeração, em ensaios de maiores distâncias.

A partir das imagens dos desgastes, exibidas na Figura 27, tem-se os diâmetros das crateras, apresentados na Tabela 10, para complementar o entendimento do desgaste gerado, para cada uma das distâncias percorridas.

Tabela 10: Distância Percorrida e Diâmetro do Desgaste: Óleo Mineral

Distância (m)	**Diâmetro (mm)**	**Variação Diâmetro (mm)**
1000	0.62	-
2000	0.65	0.03
3000	0.67	0.02
4000	0.80	0.13
5000	1.00	0.20

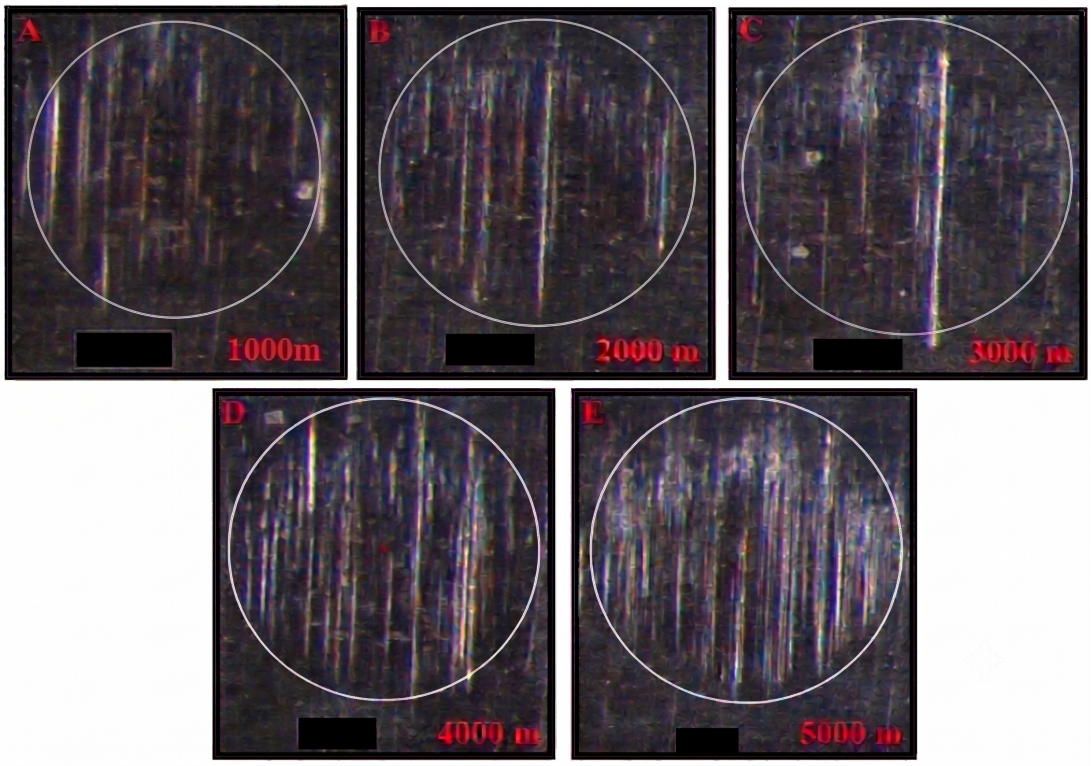
Fonte: Próprio Autor

Ao observar a relação, entre a distância percorrida e o diâmetro do desgaste, presentes na Tabela 10, nota-se que, até a distância de 3000 metros, houveram variações no diâmetro, menores que 0,01 mm, já para as distâncias de 3000-5000 metros, o diâmetro do desgaste, variou de 0,1-0,2 mm, indicando uma correlação não linear entre a variação do diâmetro e o aumento da distância percorrida, devido a variações de parâmetros, como viscosidade, e temperaturas envolvidas.

4.3.2 Ensaio de Desgaste: Óleo Sintético

Os ensaios de desgaste, para o óleo sintético, seguiram os mesmos procedimentos do óleo mineral, resultando em 5 imagens, uma para cada distância percorrida, partindo de 1000 metros, até 5000 metros, com acréscimos de 1000 metros entre elas, conforme apresentam as Figuras 28 A, B, C, D e E.

Figura 28: Desgaste para distâncias de 1000, 2000, 3000, 4000 e 5000 metros aplicando óleo sintético



Fonte: Próprio Autor

O óleo lubrificante sintético possui características lubrificantes muito maiores que suas funções como refrigerante. Por isso, no início dos ensaios, para distâncias menores, onde, ainda, não se tem altas temperaturas envolvidas, o óleo possui um desempenho melhor que o fluido de corte.

Já, no final dos ensaios, onde, devido à um maior tempo de atrito, tem-se uma maior taxa de desgaste agregada, já que possui um poder refrigerante menor, proporcionado por uma viscosidade relativa maior.

A Tabela 11, a seguir, exibe os diâmetros de cratera, para cada uma das distâncias percorridas, durante o desgaste, onde é possível analisar, através de valores, os diâmetros referentes às imagens apresentadas na Figura 28.

Tabela 11: Distância Percorrida e Diâmetro do Desgaste: Óleo Sintético

Distância (m)	**Diâmetro (mm)**	**Variação Diâmetro (mm)**
1000	0.54	-
2000	0.58	0.04
3000	0.66	0.08
4000	0.73	0.07
5000	0.90	0.17

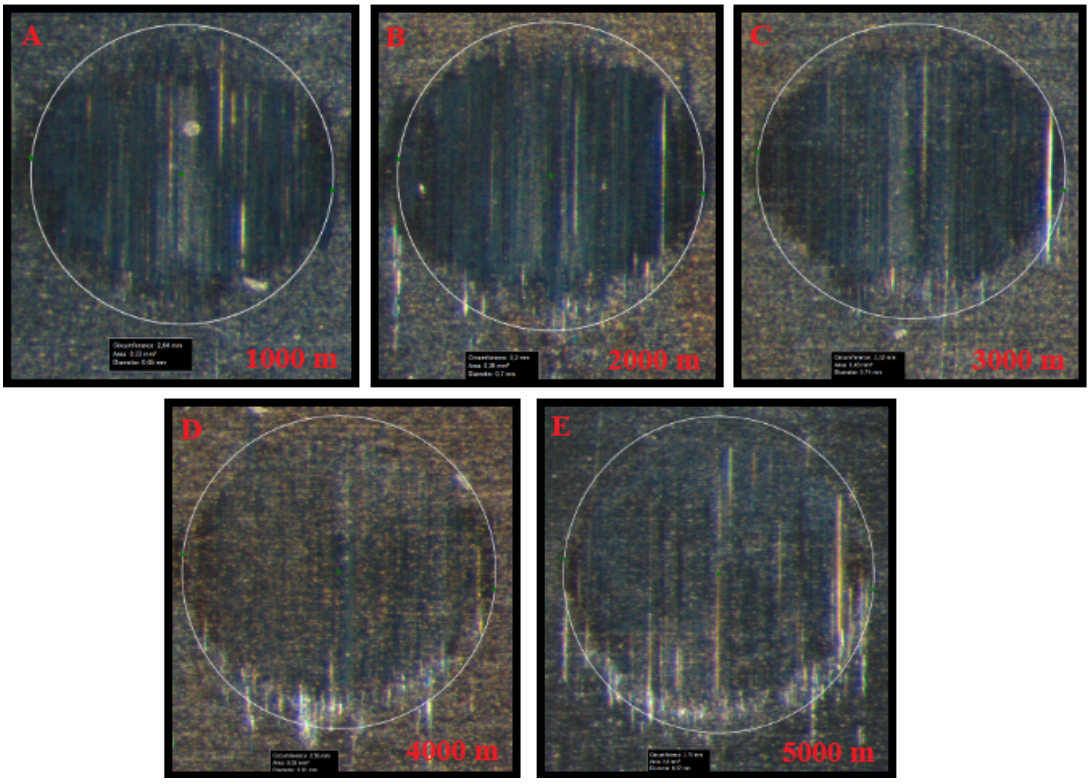
Fonte: Próprio Autor

Analisando a Tabela 11, nota-se que a variação do diâmetro aumenta, conforme a distância aumenta. A variação do diâmetro, inicialmente, da distância de 1000 m, para 2000 m, foi de 0.04 mm, já no fim, da distância de 4000 m, para 5000 m, a variação foi de 0.17 mm. Podendo-se observar, novamente, um comportamento não linear, o qual pode ter sido causado por fatores como a alteração temperatura, e mudança da microestrutura da superfície da esfera.

4.3.3 Ensaio de Desgaste: Fluido de Corte

Ao fim dos ensaios, obteve-se 5 imagens, as quais são apresentadas pela Figura 29 A, B, C, D e E.

Figura 29: Desgaste para distâncias de 1000, 2000, 3000, 4000 e 5000 metros aplicando fluido de corte



Fonte: Próprio Autor

No início dos ensaios com o fluido de corte, a lubrificação ainda é menor, devido à um menor tempo de exposição, se comparado à distâncias maiores, e isso faz com que o fluido de corte, o qual possui características refrigerantes mais acentuadas, se comparado à seu potencial lubrificante, tenha uma taxa de desgaste maior.

Se tratando de um ensaio de baixa remoção de material onde, no início, a temperatura ainda não é acentuada, o fluido de corte convencional tem um desempenho menor, no início, por ter suas características lubrificantes menos acentuada, se comparada aos outros óleos. Já, para distâncias maiores, onde a temperatura envolvida é maior, e o fluido já está espalhado pela superfície de contato, a mais tempo, apresenta um melhor desempenho, devido ao seu alto potencial de refrigeração e o fato de não

possuir contaminantes, como os óleos usados.

Para compreender melhor a dimensão dos diâmetros das crateras, mostrados na Figura 29, geradas pelo desgaste, a Tabela 12 apresenta as distâncias percorridas, o diâmetro de cratera e sua variação, respectivamente.

Tabela 12: Distância Percorrida e Diâmetro do Desgaste: Fluido de Corte

Distância (m)	Diâmetro (mm)	Variação Diâmetro (mm)
1000	0.65	-
2000	0.70	0.05
3000	0.74	0.04
4000	0.81	0.07
5000	0.87	0.06

Fonte: Próprio Autor

Uma análise da Tabela 12, mostra um acréscimo no diâmetro da cratera, conforme aumenta-se a distância percorrida, entretanto, apresenta menores variações no diâmetro, em comparação com a utilização do óleo sintético e mineral.

Observa-se que tanto para as imagens com a utilização do fluido de corte, quanto para os óleos mineral e sintético, o mecanismo de desgaste atuante foi o riscamento, os quais são formados em processos de ensaios de desgate, onde há apenas 2 corpos em atrito.

4.4 Bit Ferramenta Após a Realização dos Ensaios

Após a realização dos ensaios de desgaste, com a utilização dos óleos lubrificantes, o bit ferramenta apresentou uma mudança em sua coloração, conforme apresenta a Figura 30.

Figura 30: Alteração da Coloração do Bit Ferramenta Após Ensaios Com Óleo Lubrificante



Fonte: Próprio Autor

A mudança apresentada na Figura 30, é característica da ação de oxidação, o qual pode ter sido ocasionada pela ação do oxigênio com a ferramenta, ou até mesmo, entre os componentes ácidos, presentes nos óleos lubrificantes. (STACHOWIAK;

BATCHELOR, 2013). Como o óleo lubrificante já estava desgastado, os aditivos responsáveis por neutralizar a ação dos ácidos, presentes, já não realiza mais suas funções, permitindo reações químicas com estruturas metálicas (BELMIRO; CARRETEIRO, 2006).

4.5 Volume da Cratera

Com os valores do diâmetro de cratera (d), e o raio da esfera (R = 12,675 mm), pôde-se calcular o volume de cratera, na utilização de cada um dos óleos e fluido de corte, através da Equação 2, os quais estão apresentados na Tabela 13.

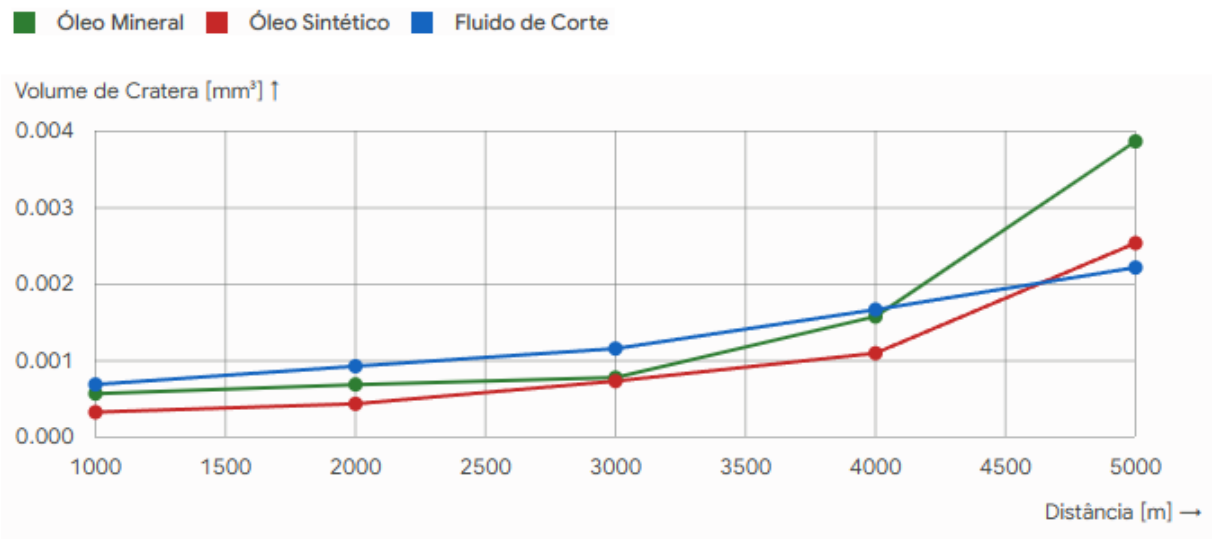
Tabela 13: Volume de Cratera

Distância (m)	**Óleo Mineral** (mm^3)	**Óleo Sintético** (mm^3)	**Fluido de Corte** (mm^3)
1000	$5,72.10^{-4}$	$3,29.10^{-4}$	$6,91.10^{-4}$
2000	$6,91.10^{-4}$	$4,38.10^{-4}$	$9,30.10^{-4}$
3000	$7,80.10^{-4}$	$7,35.10^{-4}$	$1,16.10^{-3}$
4000	$1,58.10^{-3}$	$1,10.10^{-3}$	$1,67.10^{-3}$
5000	$3,87.10^{-3}$	$2,54.10^{-3}$	$2,22.10^{-3}$

Fonte: Próprio Autor

A partir dos dados obtidos com a Tabela acima, construiu-se um Gráfico, para facilitar a visualização dos comportamentos de retirada de volume, conforme apresenta a Figura 31.

Figura 31: Volume Perdido em Função da Distância



Fonte: Próprio Autor

4.6 Taxa de Desgaste

A partir dos volumes calculados, chega-se aos cálculos das taxas de desgaste para as crateras obtidas. Para o cálculo da taxa de desgaste, utilizou-se a Equação 6. Os resultados obtidos estão expostos na Tabela 14.

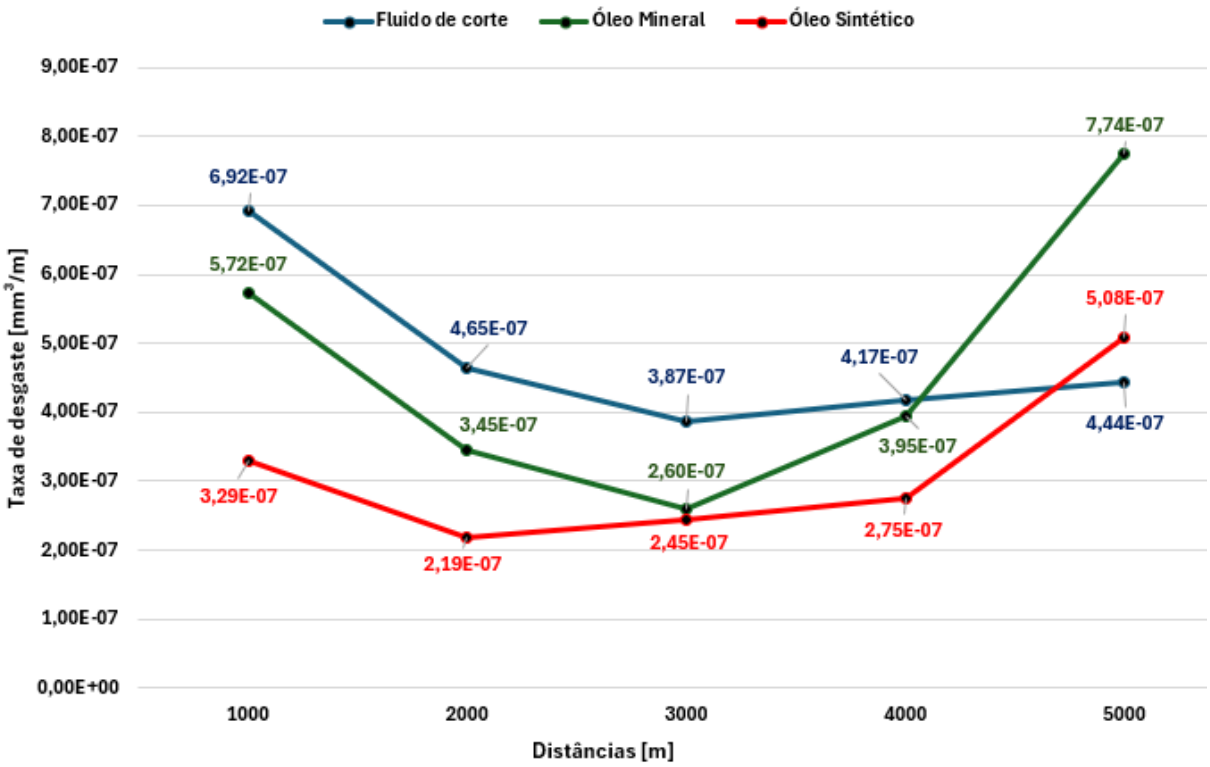
Tabela 14: Taxa de desgaste para cada fluido

Distância (m)	**Mineral** (mm^3/m)	**Sintético** (mm^3/m)	**Fluido de Corte** (mm^3/m)
1000	$5,72.10^{-7}$	$3,29.10^{-7}$	$6,91.10^{-7}$
2000	$3,45.10^{-7}$	$2,19.10^{-7}$	$4,65.10^{-7}$
3000	$2,60.10^{-7}$	$2,45.10^{-7}$	$3,87.10^{-7}$
4000	$3,95.10^{-7}$	$2,75.10^{-7}$	$4,17.10^{-7}$
5000	$7,74.10^{-7}$	$5,08.10^{-7}$	$4,44.10^{-7}$

Fonte: Próprio Autor

A Taxa de desgaste, em cada uma das situações, de aplicação dos fluidos, durante os ensaios de desgaste, possuem comportamentos diferentes, com a variação da distância percorrida, os quais são melhor visualizados através de um gráfico, como expõe, a Figura 32 a seguir.

Figura 32: Taxa de desgaste x Distância



Fonte: Próprio Autor

Embora não haja altas velocidades de deslizamento, no ensaio, que provoquem altas temperaturas no sistema, há temperaturas envolvidas, como a temperatura de flash, a qual permite um aumento extremo e súbito da temperatura na superfície do bit, devido às irregularidades de sua camada superficial, onde microscópicas áreas superficiais, dissipam o calor gerado pelo atrito, gerando aumento extremo de temperatura, nessa pequena região superficial. Embora a elevação de temperatura não afete camadas profundas do bit, esse aumento de temperatura superficial, permite que ocorram reações químicas na superfície, por meio do ataque dos ácidos, presentes no óleo, como derivações do enxofre (ASTM International, 2017), por exemplo, promovendo alteração de sua coloração e formação de óxidos frágeis, os quais são facilmente removidos pelo atrito constante (KALIN, 2004).

O gráfico da Figura 32, o qual apresenta as taxas de desgaste, apresenta uma curva, em todos os fluidos de ensaio. Tal comportamento está relacionado à viscosidade, de cada um dos fluidos, e o atrito é o principal gerador de desgaste. Com isso, o fluido de corte convencional, apresenta um desgaste maior, já que seu potencial de refrigeração é maior que o lubrificante. Entretanto, o óleo mineral, mesmo possuindo uma viscosidade maior que o óleo sintético, proporcionou um desgaste maior. Este acontecimento pode ser explicado pelo fato, desses dois óleos já terem sido usados, e possuírem suas bases químicas oxidadas. No entanto, a base química mineral se degrada muito mais que a base sintética, que é produzida em laboratório, acumulando mais ácidos, os quais não foram retirados pela filtração, acelerando o desgaste do bit. Além do mais, a camada protetiva dos óleos é quem protege a ferramenta do desgaste, e são os aditivos presentes, que são responsáveis por esse papel. Tendo em mente, que os óleos de base mineral apresentam maior desgaste, após seu uso, em relação ao óleo sintético, o óleo mineral apresenta uma menor quantidade de aditivos remanescentes, após sua utilização, o que faz com que sua camada protetiva, seja menos eficiente, em relação ao óleo sintético, proporcionando um maior desgaste (AZEVEDO; CARVALHO; FONSECA, 2005b).

Há outros fatores que desempenham grande importância para a geração do desgaste, como o índice de viscosidade (IV) e a molhabilidade dos fluidos envolvidos. Os óleos minerais, possuem um índice de viscosidade menor, fazendo com que a sua viscosidade não seja tão estável, com a variação de temperatura. De acordo com (TRIVEDI; BHATT, 2017), óleos com baixos índices de viscosidade possuem uma capacidade menor de manter uma película protetora, que separa as duas superfícies, durante variações de temperatura, pois com o aumento da temperatura, a viscosidade abaixa, fragilizando e abaixando a espessura da película lubrificante, permitindo o contato direto entre as superfícies e o aumento da taxa de desgaste. Além do mais, devido ao fato de haver enxofre em sua composição, há também, um aumento da oxidação de seus aditivos, após seu uso, fazendo com que sua capacidade de lubrificação seja severamente prejudicada. Tanto a estabilidade, quanto a oxidação de seus aditivos, fazem com que o óleo mineral, mesmo possuindo uma viscosidade maior, apresente uma taxa de desgaste superior, quando comparado ao óleo sintético, que possui como base, um composto sintético, livre de impurezas, produzido em laboratório. Ao observar a molhabilidade dos óleos, tem-se o fluido de corte convencional, com o maior fator, em seguida, tem-se o óleo sintético, e por fim, o óleo mineral. Um óleo com alta molhabilidade, permite que consiga acessar uma superfície maior da peça, através do efeito de capilaridade, e com isso, aplicar seus efeitos de lubrificação e refrigeração (VIEIRA, 2015).

No centro do Gráfico, há um comportamento semelhante, com a utilização dos três fluidos, que é a redução da taxa de desgaste. Tal comportamento acontece, devido ao fato de haver uma quantidade maior de fluido espalhado sobre a superfície de contato, e também, devido à superfície, inicialmente irregular, da esfera, os quais foram-se arrancando os picos mais altos, responsáveis por proporcionarem um maior desgaste no início (BRESSAN; SCHOPF, 2011).

No fim do ensaio de desgaste, para distâncias maiores, até 5000 metros, há uma maior temperatura envolvida, fazendo com que os fluidos que possuam maior potencial de refrigeração, proporcionem uma taxa de desgaste menor. A Figura 32 mostra uma queda, seguida de um aumento, na taxa de desgaste dos fluidos, em análise, mostrando que o fluido de corte convencional, apresenta um melhor desempenho, devido à seu alto índice de viscosidade, o qual permite manter suas características estáveis, mesmo sob variação de temperatura, e devido à seu alto potencial de molhabilidade, que permite um melhor desempenho, ao se tratar de trocar calor. Já o óleo sintético, por possuir uma base livre de enxofre, sofre menos oxidação de seus aditivos, após ser utilizado, além de possuir um índice de viscosidade e molhabilidade, maiores, permitindo que ele tenha um potencial maior de lubrificação e troca de calor, se comparado ao óleo mineral.

No fim dos ensaios, para maiores distâncias, há também, a hipótese de que tenha ocorrido oxidação do bit ferramenta, pois, houve alterações na coloração do bit, indicando a oxidação (BELMIRO; CARRETEIRO, 2006). E o aumento da taxa de desgaste, no final dos ensaios, pode ter sido provocado pela corrosão da superfície metálica do bit, após a oxidação, já que os aditivos responsáveis por anular a corrosão metálica, foram desgastados pelo pré uso dos lubrificantes, nos automóveis, e também, devido a alta concentração de ácidos, presentes nos óleos lubrificantes usados, resultante de sua contaminação pelos subprodutos da combustão e depósitos de oxidações. A corrosão da superfície metálica, no bit, pode ter sido acelerada, devido à alta concentração de ácidos, presentes nos óleos lubrificantes (ASTM International, 2017).

A análise dos resultados demonstra que a distância percorrida exerce uma influência crítica na integridade superficial da amostra. Observou-se que o processo de desgaste pode acarretar em um aumento progressivo na rugosidade da superfície (R_a) da esfera, em relação ao estado inicial (ZULKIFLI et al., 2025). À medida que a superfície se torna mais áspera, as irregularidades microscópicas, ou asperezas, tornam-se proeminentes o suficiente para romper a continuidade do filme de óleo gotejado. Este fenômeno provoca o contato direto entre os metais, resultando em um aumento brusco da força friccional e, consequentemente, na elevação da taxa de desgaste nos estágios finais do ensaio .

Adicionalmente, verificou-se que o trabalho mecânico realizado durante o deslizamento pode induzir o encruamento da camada superficial da esfera, elevando a microdureza do material. Embora esse aumento de dureza possa sugerir uma maior resistência, ele reduz a ductilidade da superfície ao longo do tempo. Superfícies excessivamente endurecidas e rugosas tendem a comprometer a estabilidade da película lubrificante, facilitando o contato direto entre as partes e justificando a transição para um regime de desgaste mais agressivo conforme a distância de ensaio aumenta (ZULKIFLI et al., 2025). Há outras possibilidades, que podem causar o aumento na taxa de desgaste, com o passar do tempo, nos ensaios de desgaste, como o alisamento su-

perficial, oque pode causar a quebra da película protetora, impactando na capacidade de lubrificação, pelo fluido de corte, e também a formação de novas asperezas acarretando em um acréscimo da taxa de desgaste, promovendo uma maior severidade no atrito (SHIREESHA et al., 2024) e (NALINI, 2022).

Observou-se que, tanto nas condições com aplicação de fluido de corte quanto para os óleos mineral e sintético, o mecanismo de desgaste predominante foi o riscamento. Esse fenômeno é característico de ensaios de desgaste envolvendo o contato tribológico entre apenas dois corpos.

5 CONCLUSÕES

Esta pesquisa avaliou a viabilidade técnica da aplicação do Óleo Lubrificante Usado ou Contaminado (OLUC) — mineral e sintético — como fluido de corte substituto na usinagem. Os ensaios com o fluido convencional apresentaram taxas de desgaste (em mm^3/m) de $6,92 \cdot 10^{-7}$, $4,65 \cdot 10^{-7}$, $3,87 \cdot 10^{-7}$, $4,17 \cdot 10^{-7}$ e $4,44 \cdot 10^{-7}$ para as distâncias de 1000, 2000, 3000, 4000 e 5000 metros, respectivamente. O óleo mineral registrou taxas de $5,72 \cdot 10^{-7}$, $3,45 \cdot 10^{-7}$, $2,60 \cdot 10^{-7}$, $3,95 \cdot 10^{-7}$ e $7,74 \cdot 10^{-7}$, enquanto o sintético obteve $3,29 \cdot 10^{-7}$, $2,19 \cdot 10^{-7}$, $2,45 \cdot 10^{-7}$, $2,75 \cdot 10^{-7}$ e $5,08 \cdot 10^{-7}$ para os mesmos intervalos.

Os resultados demonstram que, até a distância de 4000 metros, ambos os óleos usados proporcionaram lubrificação superior à do fluido convencional, reduzindo a taxa de desgaste do bit de aço ferramenta. Esse comportamento valida o potencial do OLUC como alternativa viável e sustentável para processos de usinagem com menor percurso de contato.

Contudo, aos 5000 metros, o fluido convencional demonstrou maior eficácia, superando a proteção dos óleos usados, que sofreram um salto na taxa de desgaste. Levanta-se a hipótese de que esse fenômeno seja governado pelas alterações mecânicas e pela evolução da topografia superficial na interface de contato. Com o avanço do ensaio, o aumento da rugosidade pode ter gerado asperezas metálicas que romperam a integridade da película lubrificante gotejada, estabelecendo o contato direto metal-metal. Supõe-se que esse processo tenha sido agravado pelo encruamento da superfície da esfera e pela ação de compostos ácidos remanescentes no OLUC, os quais podem ter fragilizado a superfície da ferramenta por oxidação localizada, facilitando a remoção de material por atrito.

Conclui-se que a substituição pelo OLUC é viável e vantajosa em regimes de trabalho contidos (até 4000 metros). Para distâncias maiores, o acúmulo de fadiga mecânica supera a capacidade de regeneração do filme de óleo. A consolidação industrial dessa alternativa requer investigações adicionais sobre os fatores térmicos, microestruturais e químicos de oxidação que delimitaram o escopo deste trabalho.

6 Sugestões de Trabalhos Futuros e Melhorias

- Utilizar uma esfera com uma rugosidade maior, para que os desgastes gerados, apresentem uma calota mais definida, quando se tratar de utilizar óleos lubrificantes ao invés de abrasivos.
- Realizar os ensaios de desgaste com uma esfera que tenha rugosidade superficial uniforme, ou com baixa variação de um ponto para outro, para garantir um resultado mais assertivo.
- Conduzir os testes de desgaste com um dosador de líquidos que seja capaz de se adequar, em escoamento, às diferentes viscosidades dos fluidos utilizados, para garantir que seja possível atingir um mesmo escoamento para todos os fluidos, independente das viscosidades dos mesmos.
- É interessante, para trabalhos futuros, realizar os testes de desgaste, com a adição de água, aos óleos usados, para aumentar sua quantidade, o que poderia melhorar ainda mais, sua viabilidade econômica e ambiental.
- Realizar a análise de temperatura do sistema ferramenta-esfera e a possibilidade de haver presença de óxidos, na superfície do bit, após os ensaios, verificando, assim, o desgaste por oxidação superficial.

Referências

ALMEIDA, F. *O bom negócio da sustentabilidade*. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 2002. 191 p.

AMARANTE, I. C. d. S.; ALVA, J. C. R. Os impactos na saúde humana e no meio ambiente decorrentes do manejo e descarte indevidos dos resíduos de óleos lubrificantes. In: *Anais do V Seminário Internacional de Integração e Desenvolvimento Regional*. Salvador: Universidade Católica do Salvador, 2018. p. 1–18.

ARANTES, L. J. *Avaliação do desempenho de fluidos dielétricos no processo de usinagem por descargas elétricas*. 109 p. Dissertação (Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)) — Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2001.

ASTM International. *ASTM D664-11a(2017): Standard Test Method for Acid Number of Petroleum Products by Potentiometric Titration*. West Conshohocken, 2017. Norma técnica.

AZEVEDO, J. B.; CARVALHO, L. H.; FONSECA, V. M. Propriedades reológicas de óleos lubrificantes minerais e sintéticos com degradação em motor automotivo. In: *Anais do 8º Congresso Brasileiro de Polímeros*. Águas de Lindóia: Associação Brasileira de Polímeros, 2005. p. 583–584.

AZEVEDO, J. B.; CARVALHO, L. H. d.; FONSECA, V. M. Efeito da degradação do motor automotivo nas propriedades termogravimétricas de óleos lubrificantes minerais e sintéticos. In: *Anais do 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás*. Salvador: Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás, 2005. p. 1–6.

BELMIRO, P.; CARRETEIRO, R. P. *Lubrificantes e lubrifcação*. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2006. 394 p.

BRESSAN, J. D.; SCHOPF, R. A. Resistência ao desgaste abrasivo de aços ferramenta avaliada por meio do ensaio pino-disco. In: *Anais do 66º Congresso Anual da ABM*. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, 2011. p. 1785–1796.

CARDOSO, F. A. et al. Análise da destinação final do óleo lubrificante usado ou contaminado (OLUC) gerado na cidade de Manaus-AM. *Research, Society and Development*, v. 11, n. 4, p. e30111427306, 2022. 12 p.

CARPINETTI, L. C. R. et al. *Rugosidade superficial: conceitos e princípios de medição*. São Carlos, 1996. 35 p.

CARPIO, R. C.; SILVA, R. J. da; JORGE, A. B. Otimização da mistura de combustíveis secundários alternativos visando atender as restrições operacionais e ambientais em fornos de cimenteiras. *Optimization*, p. 10, 2003.

CAVALCANTE, G. H. R. et al. Estudo viscosimétrico de polióis a base do óleo de andiroba (carapa guianensis aubl.). *Revista Virtual de Química*, v. 8, n. 3, p. 926–944, 2016.

CELESTINO, V. R. d. B. *Análise comparativa do uso de ferramentas de metal duro sem revestimento e revestidas com diboreto de titânio na usinagem da madeira*. 194 p. Dissertação (Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)) — Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento. *Our common future: Report of the World Commission on Environment and Development*. Genebra, 1987. 400 p. Relatório Brundtland.

CONAMA. *Coleta de óleo lubrificante usado ou contaminado – 2020 (ano base 2019)*. 2020. Disponível em: ⟨https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/emissoes-e-residuos/residuos/arquivos/Relatorio-Conama-2020-ano-base-2019.pdf⟩. Acesso em: 17 ago. 2025.

CONAMA, C. N. do M. A. *Destinação Final do OLUC*. 2005. Disponível em: ⟨https://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=457⟩. Acesso em: 29 set. 2025.

CONSTROLEO. *Como ocorre o processo de rerrefino e de qual maneira podemos contribuir com a preservação do meio ambiente*. 2023. Disponível em: ⟨https://constroleo.com.br/2023/06/processo-de-rerrefino-e-de-qual-maneira-podemos-contribuir-com-a-preservacao-do-meio-amb⟩. Acesso em: 30 set. 2025.

CORAZZIM, M. *Automatização de medição de desgaste em insertos de brocas por meio de visão computacional*. 65 p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Controle e Automação)) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, 2018.

COZZA, R. C. *Estudo do desgaste e atrito em ensaios micro-abrasivos por esfera rotativa fixa em condições de força normal constante e pressão constante*. 327 p. Tese (Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica)) — Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

CYBIS, L. F. d. A. et al. Avaliação do sistema de gerenciamento de óleos lubrificantes usados ou contaminados no brasil. *Tecno-lógica. Santa Cruz do Sul. Vol. 21, n. 2 (jul./dez. 2017), p. 75-79*, 2017.

DALY, H. A economia ecológica e o desenvolvimento sustentável. *Estudos Avançados*, v. 5, n. 13, p. 161–178, 1991.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. *Tecnologia da usinagem dos materiais*. 9. ed. São Paulo: Artliber, 2014. 272 p.

DUQUE, J. F. *Avaliação do mercado brasileiro de óleos lubrificantes: produção, consumo, reaproveitamento e perspectivas*. 102 p. Dissertação (Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos)) — Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

FERRAMENTAL. *Desgaste em matrizes de forjamento*. 2019. Disponível em: ⟨https://www.revistaferramental.com.br/artigo/desgaste-em-matrizes-de-forjamento/⟩. Acesso em: 05 out. 2023.

FERRARESI, D. *Fundamentos da usinagem dos metais*. São Paulo: Edgard Blücher, 1997. 751 p.

FIGLIUOLO, S. Q. et al. Estudo da técnica de minimização de fluido de corte em processos de usinagem. *Blucher Engineering Proceedings*, v. 6, p. 179–186, 2019.

FOX, R. W.; MCDONALD, A. T.; PRITCHARD, P. J. *Introdução à mecânica dos fluidos*. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2001. 662 p.

GOMES, J. F.; ALVES, S. M. Adequação ambiental dos processos de usinagem utilizando produção mais limpa. *Produção*, v. 17, n. 1, p. 131–143, 2007.

GRANDO, A. J. *Avaliação do Óleo Lubrificante Usado ou Contaminado (OLUC) como agente redutor de viscosidade do asfalto-borracha*. 61 p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Infraestrutura)) — Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2022.

JR, J. T. B. Survey of possible wear mechanisms. *Wear*, Elsevier, v. 1, n. 2, p. 119–141, 1957.

KALIN, M. Influence of flash temperatures on the tribological behaviour in low-speed sliding: a review. *Materials Science and Engineering: A*, Elsevier, v. 374, n. 1-2, p. 390–397, 2004.

LIANG, G. et al. An investigation of the influence of initial roughness on the friction and wear behavior of ground surfaces. *Materials*, MDPI, v. 11, n. 2, p. 237, 2018.

MACHADO, Á. R. et al. *Teoria da usinagem dos materiais*. 3. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2015. 412 p.

MELLOR, B. G. (Ed.). *Surface coatings for protection against wear*. Cambridge: Woodhead Publishing, 2006. 448 p. ISBN 978-1-85573-767-9.

METALURGIA, R. *Desgaste por Adesão: O que é e como prevenir*. Disponível em: ⟨https://rijeza.com.br/blog/desgaste-por-adesao-o-que-e-e-como-prevenir/⟩. Acesso em: 05 out. 2023.

METALURGIA, R. *A importância do conhecimento de tribologia para a melhoria a gestão da manutenção*. Disponível em: ⟨https://rijeza.com.br/blog/tribologia-o-que-e/#:~:text=Na%20ind%C3%BAstria%20de%20alimentos%2C%20a,por%20abras%C3%A3o%2C%20resist%C3%AAncia%20ao%20impacto.⟩. Acesso em: 03 abr. 2024.

MUNITOR, L. H. *Análise da influência do fluido de corte no desempenho da usinagem HSM em liga de alumínio-silício hipoeutética*. 66 p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica)) — Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

MUNIZ, C. A. d. S. *Novas formulações de fluidos de corte: otimização, propriedades e recuperação do óleo usado*. 143 p. Tese (Tese (Doutorado em Engenharia Química)) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.

NALINI, E. P. *Pin versus disc tribological tests for three metallic pairs: microstructural characterization of tribofilms and debris*. 43 p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Metalúrgica)) — Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

NOVAIS, J. F. d. C. *Estudo do desgaste de ferramentas na maquinagem de aços inoxidáveis*. 91 p. Dissertação (Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)) — Escola Superior de Tecnologia e Gestão, Instituto Politécnico de Viana do Castelo, Viana do Castelo, 2022.

OLIVEIRA, D. L. d. *Construção de um equipamento de ensaio de desgaste micro abrasivo por esfera rotativa fixa para análise do desgaste em revestimento duro aplicado por soldagem*. 84 p. Dissertação (Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)) — Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2015.

OLIVEIRA, P. R. d. S. d. *Avaliação tribológica de condicionadores de metais comerciais através do teste pino-disco*. 67 p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica)) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2022.

OZAKIN, B. A comparative study of the selection of cutting fluids used in machining processes by multi criteria decision making (mcdm) methods. *Sadhana*, Springer, v. 48, n. 4, p. 204, 2023.

PEREIRA, R. M. *A logística reversa associada e aplicada a óleos lubrificantes, seus resíduos e embalagens*. 64 p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Produção)) — Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2017.

PETRóLEO, I. B. de. *ÓLEOS LUBRIFICANTES USADOS E CONTAMINADOS (OLUC) – COLETA E RERREFINO*. 2024. Disponível em: ⟨https://www.ibp.org.br/documents/62/boletim-lubrificantes-i-junho-de-2024.pdf⟩. Acesso em: 21 fev. 2026.

RAC, A.; VENCL, A. Ecological and technical aspects of the waste oils influence on environmental. *The Annals of University "Dunărea de Jos" of Galaţi. Fascicle VIII, Tribology*, v. 18, n. 1, p. 31–36, 2012.

SANTOS, D. F. d. *A importância da lubrificação nas indústrias*. 39 p. Monografia (Monografia (Especialização em Engenharia de Manutenção Industrial)) — Instituto de Ensino Superior de Jacareí, Jacareí, 2019.

SATURNINO, T. A.; FERNANDES, P.; DUPONT, G. K. Óleo lubrificante automotivo: Metodologias para o controle de qualidade. *Caderno Intersaberes*, v. 13, n. 51, p. 42–54, 2024.

SCHOPF, R. A.; BRESSAN, J. D. Resistência ao desgaste abrasivo de aços ferramenta avaliada por meio do ensaio pino-disco. In: *Anais do VI Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação (COBEF 2011)*. Caxias do Sul, RS, Brasil: [s.n.], 2011. Trabalho COF11-0053.

SHIREESHA, Y. et al. Tribological performance analysis of pin-on-disk: Impact of wear, lubrication, friction coefficient and surface roughness. *International Journal of Progressive Research in Engineering Management and Science (IJPREMS)*, v. 04, n. 11, p. 1520–1523, November 2024.

SILVA, D. E. d. *Lubrificação industrial: análise de óleo lubrificante*. 42 p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica)) — Faculdade Evangélica de Goianésia, Goianésia, 2021.

SILVA, F. *O que é Índice de Viscosidade?* 2023. Disponível em: ⟨https://totalenergies.com.br/o-que-e-indice-de-viscosidade⟩. Acesso em: 18 nov. 2025.

STACHOWIAK, G. W.; BATCHELOR, A. W. *Engineering Tribology*. 4. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2013. 876 p. ISBN 978-0123970473.

THURESSON, B. *Flash Temperatures in Friction Contacts*. 146 p. Tese (Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica)) — Lund University, Lund, Sweden, 2000.

TRIBOLOGIA. In: Michaelis, Dicionário Brasileiro da Língua Portuguesa. Disponível em: ⟨https://michaelis.uol.com.br/busca?r=0&f=0&t=0&palavra=tribologia⟩. Acesso em: 03 abr. 2024.

TRIVEDI, H.; BHATT, D. Effect of lubricating oil on tribological behaviour in pin on disc test rig. *Tribology in Industry*, University of Kragujevac, Faculty of Engineering, v. 39, n. 1, p. 90, 2017.

TSAMBE, M. Z. A. et al. Avaliação do sistema de gerenciamento de óleos lubrificantes usados ou contaminados no brasil. *Tecno-Lógica*, v. 21, n. 2, p. 75–79, 2017.

UZÊDA, T. R. d. *Avaliação do ciclo de vida do óleo lubrificante rerrefinado: aplicação de um método simplificado*. 82 p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental)) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2014.

VERDI, J. *Dispositivo pino-disco para análise de desgaste na presença de diesel e biodiesel*. 109 p. Dissertação (Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia de Materiais)) — Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

VIEIRA, M. F. *Fluidos de corte: tipos, funções, seleção, métodos de aplicação e manutenção nos processos de usinagem*. São Luís, 2015. 48 p.

ZULKIFLI, Z. et al. Tribological analysis of treated recycled vegetable oil-based lubricants for mql machining. *Nigerian Journal of Technological Development*, v. 22, n. 1, p. 184–192, March 2025.

APÊNDICE A - MEDIDAS DE RUGOSIDADE DA ESFERA

Medição	R_a	R_y	R_z	R_q
1	1.38	9.83	9.83	2.04
2	1.14	7.38	7.38	1.50
3	1.37	8.85	8.85	1.84
4	1.31	8.28	8.28	1.74
5	1.11	6.22	6.22	1.45
6	1.05	6.64	6.64	1.41
7	1.22	8.43	8.43	1.69
8	1.07	6.57	6.57	1.41
9	1.18	7.12	7.12	1.56
10	1.15	8.01	8.01	1.63
11	1.01	5.85	5.85	1.31
12	1.78	11.60	11.60	2.34
13	1.06	7.24	7.24	1.48
14	1.22	8.92	8.92	1.66
15	1.22	7.16	7.16	1.52
16	1.89	12.38	12.38	2.48
17	1.84	12.19	12.19	2.45
18	0.96	5.69	5.69	1.24
19	0.97	5.97	5.97	1.30
20	1.15	6.65	6.65	1.48
21	1.06	6.97	6.97	1.40
22	0.97	6.06	6.06	1.29
23	1.20	7.68	7.68	1.58
24	1.57	10.33	10.33	2.07
25	1.44	10.28	10.28	1.94
26	1.03	6.26	6.26	1.35
27	1.00	5.93	5.93	1.33
28	1.13	6.35	6.35	1.44
29	1.06	7.02	7.02	1.43
30	0.99	5.47	5.47	1.31