



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – UFOP

ESCOLA DE MINAS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA



Matthews Henrique Cota Araujo

**ANÁLISE COMPARATIVA DA RESISTÊNCIA AO DESGASTE EM
SUPERFÍCIES DE AÇO 1020 LUBRIFICADAS COM
CONDICIONADOR DE METAIS EM RELAÇÃO À LUBRIFICAÇÃO
COM GRAXA DE LÍTIO.**

**OURO PRETO - MG
2023**

Matthews Henrique Cota Araujo
matthews.araujo@aluno.ufop.edu.br

**ANÁLISE COMPARATIVA DA RESISTÊNCIA AO DESGASTE EM
SUPERFÍCIES DE AÇO 1020 LUBRIFICADAS COM
CONDICIONADOR DE METAIS EM RELAÇÃO À LUBRIFICAÇÃO
COM GRAXA DE LÍTIO.**

Monografia apresentada ao Curso de
Graduação em Engenharia Mecânica
da Universidade Federal de Ouro Preto
como requisito para a obtenção do
título de Engenheiro Mecânico.

Professora orientadora: Zirlene Alves da Silva Santos, PhD.

OURO PRETO – MG
2023

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

A663a Araujo, Matthews Henrique Cota.

Análise comparativa da resistência ao desgaste em superfícies de aço 1020 lubrificadas com condicionador de metais em relação à lubrificação com graxa de lítio. [manuscrito] / Matthews Henrique Cota Araujo. - 2023. 74 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientadora: Profa. Dra. Zirlene Alves da Silva Santos.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Mecânica .

1. Condicionador de metais. 2. Desgaste mecânico. 3. Lubrificação e lubrificantes - Graxa. 4. Desgaste mecânico - ASTM G65-16. I. Santos, Zirlene Alves da Silva. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 621

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



FOLHA DE APROVAÇÃO

Matthews Henrique Cota Araujo

ANÁLISE COMPARATIVA DA RESISTÊNCIA AO DESGASTE EM SUPERFÍCIES DE AÇO 1020 LUBRIFICADAS COM CONDICIONADOR DE METAIS EM RELAÇÃO À LUBRIFICAÇÃO COM GRAXA DE LÍTIO.

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico

Aprovada em 01 de Agosto de 2023

Membros da banca

PhD - Zirlene Alves da Silva Santos - Orientador(a) - Universidade Federal de Ouro Preto
DSc - Margarida Marcia Fernandes Lima - Universidade Federal de Ouro Preto
DSc - Claudio Marcio Santana - Universidade Federal de Ouro Preto

Zirlene Alves da Silva Santos, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 16/08/2023



Documento assinado eletronicamente por **Zirlene Alves da Silva Santos, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 16/08/2023, às 11:03, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0574405** e o código CRC **1A9CD149**.

A minha família dedico mais esta etapa vencida.

A minha namorada, pelo carinho, pelo amor e por todo apoio.

AGRADECIMENTO

À minha orientadora Zirlene Alves da Silva Santos, pelo incentivo, pela oportunidade, por acreditar no potencial deste trabalho, por toda paciência e orientação para a realização deste trabalho.

À Professora Margarida Márcia Fernandes, do Departamento de Engenharia Mecânica – UFOP, pelo fornecimento do equipamento de ensaio de dureza vickers para a realização deste trabalho.

Ao técnico Marconi Cosme Silva do Departamento de Engenharia Mecânica - UFOP pelo grande apoio na realização dos experimento e análises prestados.

Aos meus pais Vera e Wander por sempre terem me desejado o bem e acreditarem no meu desenvolvimento, além de serem os pilares dos meus valores de vida. Um agradecimento especial ao meu irmão Gustavo por sempre estar ao meu lado e à minha namorada Júnia que sempre me apoiou nos momentos difíceis enfrentados durante curso.

À todos os meus amigos que me ajudaram em momentos de lazer, aos amigos criados durante o curso que estavam na mesma luta.

Às empresas, (finada) CMT, Geosol e Engelig, que paralelamente à graduação fizeram parte desse desenvolvimento pessoal e profissional, onde foi possível absorver diversos conhecimentos.

“Seja útil, Sirva o próximo, Honre sua família e não encha o saco.”.

Luciano Jaccoud (AllVento).

RESUMO

O presente trabalho, o qual possui natureza qualitativa, teve como finalidade realizar uma análise comparativa sobre o desgaste abrasivo sofrido pelo Aço SAE 1020 lubrificado com condicionador de metais e por graxa à base de lítio. O desgaste abrasivo acarreta em um elevado número de interrupções inesperadas em maquinários que operam com materiais abrasivos e possuem movimento relativo entre superfícies. Para realização desta análise comparativa foi utilizado o Abrasômetro que segue os padrões da norma ASTM G65-16, que se encontra na Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP. Tal equipamento realiza teste com parâmetros padronizados que simula o processo de desgaste abrasivo. O ensaio realizado compreende quatro etapas distintas: a caracterização do aço usado, a preparação dos corpos de prova, a preparação do abrasivo, a execução do ensaio propriamente dito, além do cálculo do volume desgastado. Os resultados alcançados demonstraram que o condicionador de metais não teve uma taxa de desgaste menor em relação à graxa de lítio, o que implica, apesar da evolução dos lubrificantes, é necessário uma maior avaliação do cenário onde tal lubrificante pode ser utilizado. Com isso, o estudo é importante para o aumento da disponibilidade física e confiabilidade dos equipamentos da indústria, na melhoria da vida útil das peças, na diminuição do desperdício de recursos físicos, além disso, é importante para a comunidade acadêmica que realiza estudos voltados à tribologia, área que possui extrema relevância para a engenharia.

Palavras-chave: Condicionador de metais. Desgaste abrasivo. Graxa à base de lítio. ASTM G65-16. Tribologia. Fenômenos tribológicos. Lubrificação. Lubrificantes.

ABSTRACT

The present work, which has a qualitative nature, aimed to perform a comparative analysis of the abrasive wear suffered by SAE 1020 Steel lubricated with metal conditioner and lithium-based grease. Abrasive wear leads to a high number of unexpected interruptions in machinery operating with abrasive materials and having relative movement between surfaces. To carry out this comparative analysis, an Abrasimeter was used, following the ASTM G65-16 standard, which is located at the Federal University of Ouro Preto - UFOP. This equipment performs tests with standardized parameters that simulate the abrasive wear process. The conducted test comprised four distinct stages: characterization of the used steel, preparation of the test specimens, preparation of the abrasive, the actual execution of the test, and the calculation of the worn volume. The results obtained showed that the metal conditioner did not have a lower wear rate compared to lithium grease, which implies that, despite the evolution of lubricants, a more thorough evaluation of the scenario where such lubricant can be used is necessary. Therefore, this study is important to increase the physical availability and reliability of industrial equipment, improve the life span of components, reduce the waste of physical resources, and it is also relevant for the academic community conducting studies in tribology, an area of extreme importance for engineering.

Keywords: *Metal conditioner. Abrasive wear. Lithium-based grease. ASTM G65-16. Tribology. Tribological phenomena. Lubrication. Lubricants.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Causas de falhas em rolamentos.	2
Figura 2 - Representação dos parâmetros estruturais de um tribossistema.	7
Figura 3 - Ilustração da textura da superfície.	8
Figura 4 - Exemplificação de um perfil de superfície.	9
Figura 5 - Representação esquemática de uma interface, mostrando as áreas de contato aparente e real. A inserção mostra os detalhes de um contato em uma escala submicrométrica.	10
Figura 6 - Exemplos de quatro diferentes condições interfaciais que comumente surgem em sistemas de atrito.	11
Figura 7 - Modelo para adesão, transferência de material e deformação plástica de detritos de desgaste.	14
Figura 8 - Representação do desgaste abrasivo a dois e três corpos.	15
Figura 9 - Regimes de atrito e desgaste de um tribo-sistema: a curva de Stribeck.	17
Figura 10 - Linha do tempo das diferentes propriedades dos lubrificantes.	19
Figura 11 - Duas superfícies em movimento relativo, separadas por uma película de óleo em escoamento laminar, com um gradiente linear de velocidade.	20
Figura 12 - Abrasômetro do tipo de roda de borracha.	26
Figura 13 - Marcas de desgaste uniformes e irregulares.	28
Figura 14 - Fluxograma do procedimento experimental.	33
Figura 15 - Amostra em processo de corte.	36
Figura 16 - Amostra embutida em resina.	37
Figura 17 - Politriz metalográfica.	37
Figura 18 - Microestrutura da amostra ampliada em 500 vezes.	38
Figura 19 - Durômetro Emcotest.	39
Figura 20 - Corpos de prova sem preparação superficial.	40
Figura 21 - Corpos de prova lixados e polidos.	41

Figura 22 - Medição de superfície com rugosímetro.	41
Figura 23 - Abrasômetro ASTM G65.....	42
Figura 24 - Corpo de prova B sendo pesado em balança de precisão.	43
Figura 25 - Condicionador de metais Militec 1®.	44
Figura 26 - a) Corpo de prova A sendo aquecido. b) Temperatura do corpo de prova A após 10 minutos de aquecimento.	45
Figura 27 - Graxa a base de sabão de lítio Unilit Blue.....	45
Figura 28 - Corpos de prova lubrificados (em A com condicionador de metais e em B com a graxa a base de sabão de lítio).....	46
Figura 29 - Monitoramento da temperatura durante o ensaio de desgaste abrasivo.	47
Figura 30 - Corpos de prova após o ensaio.	48
Figura 31 - Gráfico comparativo do volume perdido pelas amostras.....	51
Figura 32 - Cicatriz de desgaste após o ensaio.	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Procedimentos de ensaio ASTM G65-16.....	28
Tabela 2 - Tipos de finalidades de pesquisas.	30
Tabela 3 - Tipos de meios para pesquisa	31
Tabela 4 - Instrumentos e materiais utilizados	33
Tabela 5 - Variáveis e indicadores utilizados.	34
Tabela 6 - Dados do corpo de prova A.	49
Tabela 7 - Dados do corpo de prova B.....	50

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Formulação do Problema	1
1.2	Justificativa.....	3
1.3	Objetivos	4
1.3.1	Geral.....	4
1.3.2	Específicos	4
1.4	Estrutura do Trabalho	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1	Tribologia.....	6
2.2	Relação da rugosidade com a tribologia	7
2.3	Fenômenos tribológicos.....	10
2.3.1	Atrito	11
2.3.2	Desgaste.....	13
2.3.3	Lubrificação	16
2.4	Lubrificantes e processos de lubrificação	18
2.4.1	Viscosidade.....	20
2.4.2	Tipos de lubrificantes	21
2.5	Condicionadores de metais	25
2.6	Abrasômetro ASTM G65 – 16.....	26
3	METODOLOGIA.....	30
3.1	Tipo de pesquisa	30
3.2	Materiais e métodos	31
3.3	Variáveis e indicadores.....	34
3.4	INSTRUMENTAÇÃO E COLETA DE DADOS	34
3.5	TABULAÇÃO E ANÁLISE DE DADOS.....	35
3.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	35
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	36
4.1	SELEÇÃO E PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS PARA ENSAIO DE RESISTÊNCIA AO DESGASTE NO EQUIPAMENTO ASTM G65-16	36
4.2	CÁLCULO DA TAXA DE DESGASTE E COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS	
	48	

5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	53
5.1	CONCLUSÕES	53
5.2	RECOMENDAÇÕES	54
6	REFERÊNCIAS	55
	ANEXO.....	60

1 INTRODUÇÃO

1.1 Formulação do Problema

O setor de mineração possui alta relevância para a economia e desenvolvimento do Brasil, através da extração e processamento dos materiais. No ano de 2021, o faturamento do setor foi de 339,1 bilhões de reais (IBRAM, 2022), contribuindo para gerar superávit comercial do país (AMIG, 2022).

Conforme Rahimdel *et al* (2013), a melhor maneira de desenvolver um processo eficiente e eficaz na mineração, é garantir que os equipamentos tenham um alto nível de confiabilidade e disponibilidade, utilizando principalmente as técnicas de manutenção preventiva centrada na confiabilidade.

Para Germany (2002), a manutenção de equipamentos é um fator de alto custo em potencial quando se trata de operações em mineração, principalmente em casos de paradas não programadas. Segundo a Shell Lubricants (2018), o tipo correto de lubrificante pode reduzir o custo total de propriedade (TCO), aumentar a eficiência e a produtividade dos equipamentos. De acordo com o estudo realizado pela Shell Lubricants (2018), a lubrificação dos equipamentos representam menos de 5% dos custos de manutenção para a maioria das empresas, entretanto, problemas de lubrificação contribuem para cerca de 75% de todas as falhas de equipamentos.

Segundo Hutchings (1992), um lubrificante funciona como uma camada de material de menor resistência ao cisalhamento que é introduzida entre as superfícies em movimento relativo. Ainda em concordância com o mesmo autor, em alguns sistemas lubrificados, o lubrificante não consegue impedir completamente o contato áspero, embora o reduza e pode reduzir também a área de contato. Em outros casos, o lubrificante separa completamente as superfícies e nenhum contato áspero é formado. Assim, em maior ou menor grau, o uso de um lubrificante sempre reduzirá a taxa de desgaste por deslizamento, e esse é outro benefício substancial da lubrificação.

Na visão de Bhushan (2013), o termo lubrificação é aplicado a duas situações diferentes: lubrificação sólida e lubrificação por filme fluido. Um lubrificante sólido é qualquer material usado como um pó ou um filme fino e sólido em uma superfície para fornecer proteção contra danos durante um movimento relativo, reduzindo o atrito e o desgaste. Já a lubrificação por

filme fluido, pode ser líquido ou gasoso; mesmo um filme espesso de ar transposto entre duas superfícies móveis é um bom método de lubrificação.

A maioria do maquinário ligado à atividade mineradora, possui condições de operação severas, com altos gradientes de pressão e temperatura, exposição à poeira, água, entre outros (SAFRONCHUK, 2019). Todos esses condicionantes acarretam múltiplos modos de falhas nos equipamentos.

De acordo com Safronchuk (2019), até 53% de falhas em rolamentos são devido a lubrificação inadequada, vide a figura 1.

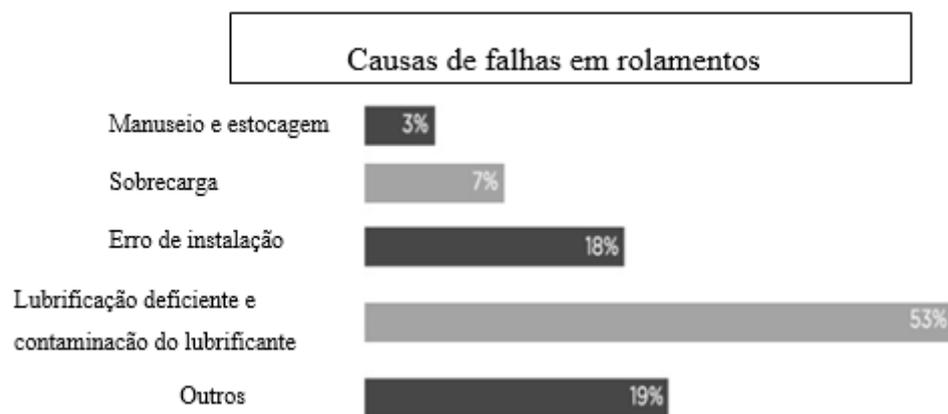


Figura 1 - Causas de falhas em rolamentos.
Fonte: Adaptado de Safronchuk (2019).

Como visto na figura 1, a principal causa de falha em rolamentos é a lubrificação inadequada e a contaminação do lubrificante (53% de todas as causas de falhas). Devido a contaminação do lubrificante o aumento do atrito é inevitável, propiciando o desgaste abrasivo à 3 corpos, que ocorre nas superfícies do rolamento, esferas e as partículas contaminantes (HUTCHINGS, 1992).

Consoante Eyre (1978), o desgaste abrasivo encontrado em instalações industriais, correspondem a cerca de 50% dos casos em que há desgaste em equipamentos ou componentes. Ainda na visão de Eyre (1978), uma grande variedade de condições causam o desgaste, com muitos mecanismos contribuindo para os danos causados. Entretanto, a solução de um problema particular requer uma identificação precisa da natureza do problema, portanto, deve-se ter cuidado ao aplicar soluções gerais a problemas individuais.

A fim de reduzir os problemas gerados pelo atrito e desgaste em equipamentos e com os adventos das novas tecnologias, a indústria automobilística tem investido em produtos

condicionadores de metais que, conjuntamente com os óleos lubrificantes, atuam como redutores de atrito, diminuindo então o desgaste de peças móveis (CORSI *et al*, 2019).

Segundo a Militec-1 (2023), o condicionador de metais é um derivado de hidrocarboneto sintético reagido quimicamente que protege o metal com uma ligação molecular impregnada baseada em compostos sintéticos. O mesmo atua dentro da estrutura molecular e microporos de superfícies de metal. O condicionador de metais usa o lubrificante como um meio de transporte para chegar às superfícies metálicas em atrito do equipamento. Chegando a essas superfícies, o condicionador de metais sai completamente do lubrificante e suas moléculas se fixam na superfície metálica por adsorção. Isso ocorre entre 38 °C e 66 °C, dependendo das condições de atrito e carga.

Ainda conforme a Militec-1 (2023), o efeito dessa reação enrijece a superfície metálica (mas sem endurecê-la), tornando-a, aproximadamente, 17 vezes mais resistente. Com esse aumento de rigidez, o atrito e o arrasto parasita são drasticamente reduzidos.

Com base no contexto apresentado, sabendo que um dos grandes problemas na manutenção é a falha da lubrificação, o problema a ser estudado é:

Qual a resistência ao desgaste abrasivo de superfícies de aço 1020 lubrificadas com condicionador de metais em comparação com a mesma superfície lubrificada com graxa de lítio?

1.2 Justificativa

Segundo Babic (2001), a tribologia e a manutenção são “parceiros por necessidade”, pois, por um lado, a tribologia empenha-se para a diminuição dos inevitáveis efeitos de atrito e desgaste, e a manutenção por outro, visa ao combate da degradação tribológica devido ao uso. Portanto, pode-se observar que a maior parte dos efeitos das melhorias tribológicas aparecem direta ou indiretamente através dos custos da manutenção.

Com isso, o estudo é importante para o aumento da disponibilidade física e confiabilidade dos equipamentos da indústria de mineração, na melhoria da vida útil das peças, na diminuição do desperdício de recursos físicos, além disso, é importante para a comunidade acadêmica que realiza estudos voltados à tribologia, área que possui extrema relevância para a engenharia.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Analisar comparativamente a resistência ao desgaste em superfícies de aço SAE 1020 lubrificadas com condicionador de metais em relação à lubrificação com graxa de lítio.

1.3.2 Específicos

- Desenvolver um estudo teórico sobre tribologia, rugosidade, fenômenos tribológicos, lubrificação, lubrificantes e condicionadores de metais;
- Classificar o tipo da pesquisa;
- Selecionar o componente para análise experimental;
- Realizar o corte do corpo de prova no tamanho adequado para análise experimental;
- Preparar dois corpos de prova (corte, lixamento, polimento, pesagem, ensaio de dureza Vickers);
- Fazer a lubrificação de um corpo de prova com o condicionador de metais e outro lubrificado com graxa de sabão de lítio;
- Predispor o equipamento ASTM G65-16 instalado no laboratório de tribologia do DEMEC para o ensaio;
- Predeterminar a granulometria do abrasivo que será utilizado;
- Efetuar o cálculo do volume arrancado, conforme a norma ASTM G65-16 e cálculo da taxa de desgaste;
- Demonstrar os resultados utilizando imagens, tabelas e gráficos;
- Comparar os resultados das amostras.

1.4 Estrutura do Trabalho

O trabalho está dividido em cinco capítulos e está escrito, conforme as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT.

O primeiro capítulo trata-se da introdução do que é abordado no trabalho, a justificativa para a realização do mesmo, objetivos gerais e específicos.

No segundo capítulo é descrito a importância dos estudos tribológicos, a evolução, conceito e suas definições, a relevância da lubrificação, os tipos de lubrificantes e por fim a apresentação dos condicionadores de metais.

O terceiro capítulo apresenta as metodologias utilizadas para a pesquisa, bem como as propostas para realizá-la.

O quarto capítulo trata do desenvolvimento do ensaio, bem como os processos realizados para obtenção dos resultados propostos.

Por fim, o quinto capítulo apresenta as conclusões obtidas ao final do trabalho, bem como as recomendações de novas pesquisas sobre o assunto.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Tribologia

Segundo Jost (1990), em 9 de março de 1966, a palavra e o conceito de tribologia foram enunciados pela primeira vez a um mundo desavisado em um relatório de um Comitê do Departamento Britânico (Ministério) de Educação e Ciência. Tribologia, palavra derivada do grego *tribos* - esfregar, atritar - *logos* - estudo -, foi definida como a ciência e tecnologia de superfícies que interagem em movimento relativo - e de assuntos e práticas associadas.

Para Hutchings (1992), a tribologia é a ciência e tecnologia que estuda o atrito, desgaste e lubrificação de superfícies que interagem em movimento relativo.

Na visão de Bhushan (2013), a tribologia é crucial para máquinas modernas que usam superfícies deslizantes e rolantes. Exemplos de atrito produtivo são freios, embreagens, rodas motoras em trens e automóveis, parafusos e porcas. Exemplos de desgaste produtivo podem ser o ato de se escrever com lápis, usinar, polir e barbear. Exemplos de atrito e desgaste improdutivos são os motores de combustão interna e de aeronaves, engrenagens, cames, rolamentos e vedações.

De acordo com Zum Gahr (1987), atrito e desgaste não são propriedades inerentes do material, mas sim características do tribossistema. O atrito é a resistência ao movimento e surge de interações de sólidos na real área de contato. Já o desgaste é definido como a perda progressiva de material das superfícies devido ao movimento relativo entre elas. O atrito e o desgaste são, respectivamente, causas graves de dissipação de energia e material.

Conforme Blau (2016), o tribossistema é um arranjo físico de duas ou mais partes estruturais em interação, incluindo os materiais de que são compostas e o ambiente em que o atrito e o desgaste estão ocorrendo.

Os tribossistemas são formados por triboelementos, que são definidos como um de dois ou mais corpos sólidos compreendendo um contato deslizante, rolante ou abrasivo, ou um corpo sujeito a choque ou cavitação. Os triboelementos podem estar em contato direto ou podem ser separados por um lubrificante, óxido ou outro filme intermediário que afete a interação tribológica entre eles. (ASTM G40-15, 2015).

Consoante Czichos (2020), os parâmetros estruturais de um tribossistema consistem nos triboelementos em contato e movimento relativo entre suas superfícies, o elemento interfacial entre as partes em contato e o ambiente em que o sistema está envolvido. Segundo Zum Gahr

(1987), a estrutura de um tribossistema é, em geral, alterada com o tempo pela ação do atrito e do desgaste. Isso pode resultar em uma alteração do comportamento funcional do sistema, seja desejada (funcional) ou indesejada (avarias).

A Figura 2 ilustra resumidamente os parâmetros estruturais de um tribossistema.

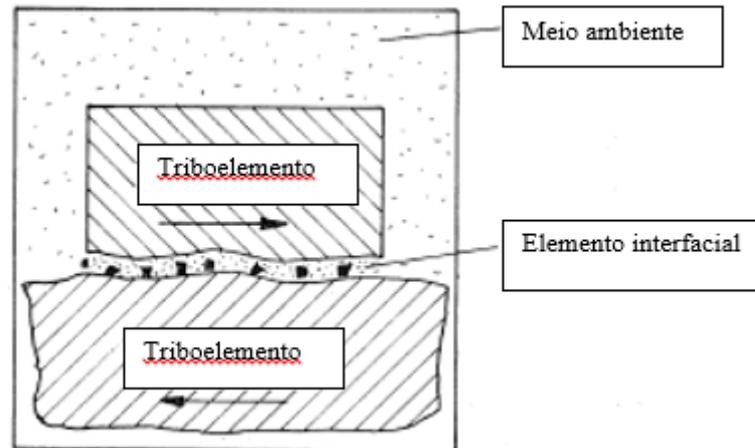


Figura 2 - Representação dos parâmetros estruturais de um tribossistema.
Fonte: Adaptado de Zum Gahr (1987).

Pode ser observado na Figura 2 os triboelementos, os quais são os sólidos em movimento relativo; o elemento interfacial, que fica em contato entre os triboelementos; e o meio ambiente, o qual circunda todo sistema.

As interações tribológicas dos componentes dos tribossistemas têm um caráter duplo. Por um lado, necessários para realizar a função técnica do tribossistema, mas, por outro lado, estão inevitavelmente ligados a processos de atrito e desgaste, levando eventualmente à dissipação de energia induzida por atrito e degradação de materiais induzida pelo desgaste (CZICHOS, 2018).

Conforme Bhushan (2013), o objetivo da pesquisa em tribologia é a minimização e eliminação de perdas resultantes de atrito e desgaste em todos os níveis de tecnologia onde o atrito entre superfícies está envolvido, portanto, a pesquisa em tribologia leva a uma maior eficiência da planta industrial, melhor desempenho, menos avarias e economias significativas.

2.2 Relação da rugosidade com a tribologia

A textura da superfície é o desvio repetitivo ou aleatório da superfície nominal que forma a topografia tridimensional da superfície. A textura da superfície inclui: rugosidade; ondulação; orientação das irregularidades; e as falhas (BHUSHAN, 2013).

Ainda na visão de Bhushan (2013), rugosidade é composta por flutuações na superfície de comprimentos de onda curtos, caracterizados por picos (asperezas, consideradas máximos locais) e vales (mínimos locais) de amplitudes e espaçamentos variados.

A figura 3 ilustra a textura de uma superfície.

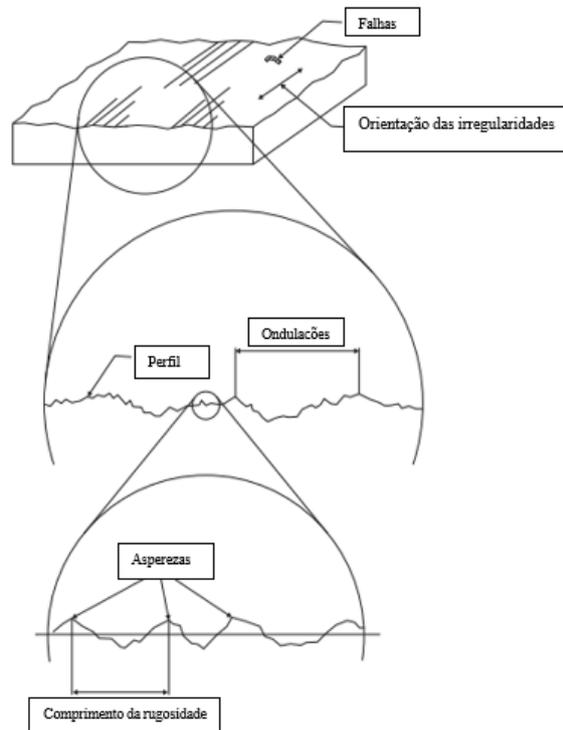


Figura 3 - Ilustração da textura da superfície.
Fonte: Adaptado de Sahoo (2011).

A ondulação, ilustrada na figura 3, é a irregularidade da superfície de comprimentos de onda mais longos e é referida como macrorrugosidade. A ondulação pode resultar de fatores como deflexões da máquina ou da peça de trabalho, vibração, tratamento térmico ou deformações. A orientação das irregularidades é a direção principal do padrão de superfície predominante, normalmente determinado pelo método de fabricação. As falhas, ilustrada na Figura 3, são interrupções não intencionais, inesperadas e indesejadas na textura. Além disso, a superfície pode conter grandes desvios da forma nominal de comprimento de onda muito longo, o que é conhecido como erro de forma. Eles normalmente não são considerados parte da textura da superfície.

Segundo Hutchings (1992), a medida mais comumente utilizada da rugosidade da superfície é a rugosidade média (R_a), que é definida como a média aritmética dos desvios das alturas da superfície da linha média até o perfil. A linha média é definida de modo que as áreas do perfil fiquem iguais, acima e abaixo dela. A figura 4 exemplifica o perfil de uma superfície.

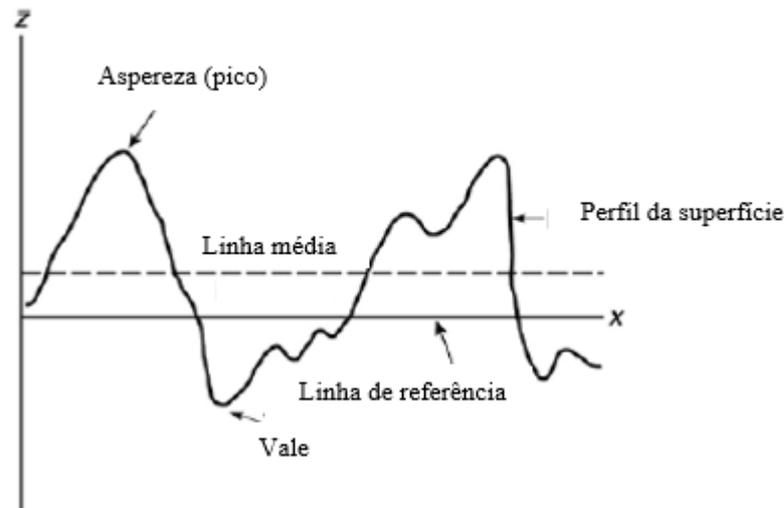


Figura 4 - Exemplificação de um perfil de superfície.
Fonte: Adaptado de Bhushan 2013.

Pode se observar na figura 4 como é definido o valor da rugosidade R_a com base nos picos e vales da textura analisada.

Como Sahoo (2011), outro parâmetro de medição de rugosidade aceito é o desvio padrão ou variância, ou ainda raiz média quadrática (RMS). Este parâmetro representa o desvio padrão da distribuição das alturas da superfície, por isso é um parâmetro importante para descrever a rugosidade da superfície por métodos estatísticos. Este parâmetro é mais sensível que a altura média aritmética (R_a) a grandes desvios da linha média. É definido como a raiz quadrada média do desvio do perfil da linha média. É indicado pelo símbolo R_q .

Para Carpinetti *et al* (1996), em algumas ocasiões, é mais importante obter informações sobre a altura das irregularidades das superfícies, por exemplo, a altura de pico-ao-vale, ao invés de se ter apenas a altura média fornecida por R_a ou R_q . Para esse caso, outros parâmetros são utilizados. O mais comum, R_{max} , corresponde à distância vertical entre os pontos mais baixos e mais altos do perfil dentro do comprimento de medição. O valor de R_{max} pode entretanto ser alterado substancialmente pela presença de um único risco ou partícula de sujeira sobre o comprimento de medição.

Em conformidade com Myshkin e Grigoriev (2013), existem muitos dados teóricos e experimentais sobre a dependência mútua da rugosidade e os fenômenos tribológicos como adesão, rigidez de contato, abrasão e muitos outros que ocorrem durante o atrito e o desgaste. Ainda em concordância com os autores, é comumente aceito que a compreensão dos fenômenos de atrito está diretamente ligada à análise da estrutura da superfície e sua transformação devido ao desgaste, portanto, atualmente, qualquer modelo de atrito e desgaste, envolve parâmetros de rugosidade da superfície.

2.3 Fenômenos tribológicos

Para Bhushan (2013), quando duas superfícies nominalmente planas são colocadas em contato, a rugosidade da superfície faz com que o contato ocorra em pontos de contato discretos (junções). A figura 5 retrata o contato em alguns pontos de contato.

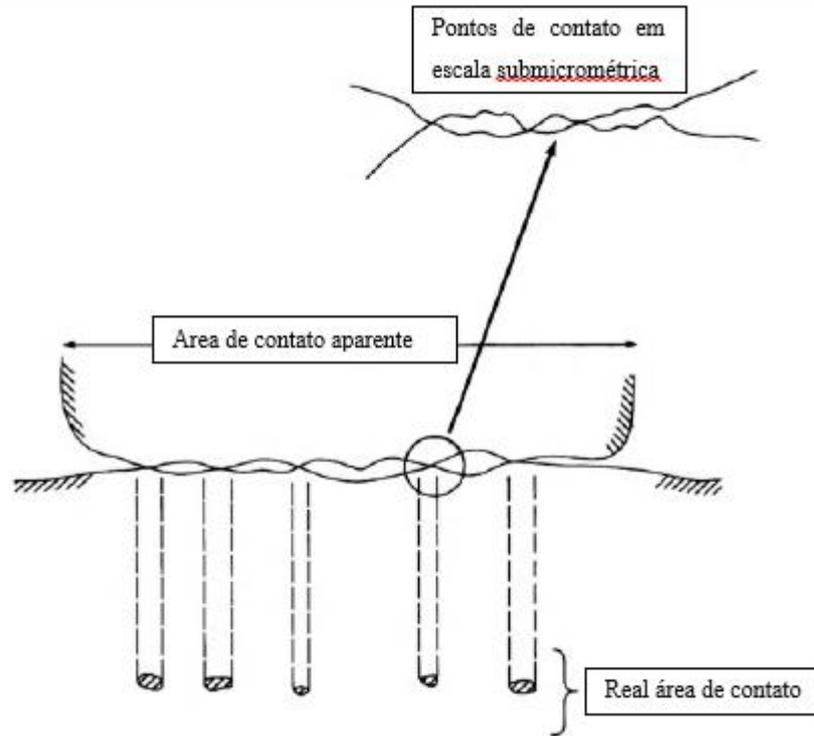


Figura 5 - Representação esquemática de uma interface, mostrando as áreas de contato aparente e real. A inserção mostra os detalhes de um contato em uma escala submicrométrica.
Fonte: Adaptado de Bhushan (2013).

Pode-se observar na figura 5 que o contato entre as superfícies ocorre em algumas áreas específicas, e não em toda superfície aparente.

A soma das áreas de todos os pontos de contato constitui a real área de contato ou simplesmente área de contato, e para a maioria dos materiais com carga aplicada, esta será apenas uma pequena fração da área de contato aparente (nominal) (que ocorreria se as superfícies fossem perfeitamente lisas). A real área de contato é uma função da textura da superfície, propriedades do material e condições de carregamento interfacial (BHUSHAN, 2013).

Segundo Archard (1953), à medida que a carga aumenta, a real área de contato aumenta de tamanho; algumas das asperezas, até então separadas, também se aproximam e se tocam para formar novas áreas de contato. Assim, assume-se que um aumento na carga aumenta tanto o número quanto o tamanho das áreas de contato.

Conforme Hutchings (1992), quando duas superfícies sólidas são colocadas juntas, o contato geralmente ocorre apenas em partes isoladas da área nominal de contato. É através dessas regiões localizadas de contato que as forças são exercidas entre os dois corpos, e são essas forças que são responsáveis pelo atrito.

2.3.1 Atrito

Consoante Czichos (2020), o atrito é a resistência ao movimento quando, sob a ação de uma força externa, um corpo se move ou tende a se mover em relação a outro corpo. Dependendo das condições cinemáticas (deslizamento, rolamento, rotação ou impacto), a força de atrito pode ser tangencial que resiste ao deslizamento ou um torque de atrito que resiste ao rolamento ou rotação.

De acordo com Bhushan (2013), o atrito não é uma propriedade do material, e sim uma resposta do sistema. Se duas superfícies sólidas estiverem limpas, sem filmes químicos e adsorbatos (substâncias retidas na superfície de um material sólido), ocorre alto atrito. Contaminantes de superfície ou filmes finos afetam o atrito. Com superfícies bem lubrificadas, geralmente são observadas fracas aderências e baixos atritos. No entanto, uma pequena quantidade de líquido presente na interface resulta em adesão mediada por líquido, o que pode resultar em alto atrito, especialmente entre duas superfícies lisas. A figura 6 exemplifica alguns tipos de atritos.

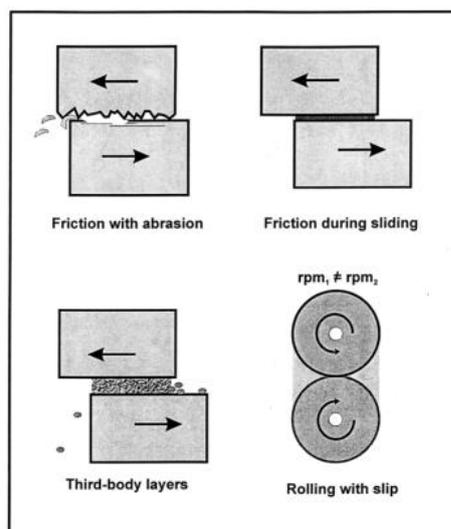


Figura 6 - Exemplos de quatro diferentes condições interfaciais que comumente surgem em sistemas de atrito.

Fonte: Adaptado de Blau (2001).

Está representado na figura 6 algumas condições interfaciais que são geradas em sistemas de atrito. Atrito na presença de asperezas duras (superior esquerdo), deslizamento

suave com ou sem camada líquida interfacial (superior direito), atrito controlado por uma camada de partículas interfaciais (inferior esquerdo) e atrito sob rolamento com deslizamento (inferior direito).

Segundo Blau (2001), o atrito abrasivo à dois corpos geralmente envolve altos coeficientes de atrito, pois os picos das asperezas de uma superfície dura podem retirar material da outra superfície e aumentar a força de atrito.

O atrito durante o deslizamento suave tende a ser menor, a menos que haja uma quantidade significativa de adesão (como em contatos muito limpos) ou se ocorrer desgaste de modo a tornar as superfícies ásperas (BLAU, 2001).

Ainda para Blau (2001), o atrito à três corpos é bastante complexo, porque pode ocorrer atrito dentro da própria camada de partículas e atrito nas interfaces das superfícies sólidas. Gradientes de densidade e poros também podem se formar nessas camadas, e a resistência ao cisalhamento das camadas de partículas está relacionada à sua densidade de maneira não linear.

Segundo Bhushan e Nosonovsky (2004), no atrito à três corpos, o contato ocorre entre picos de asperezas e partículas. Ainda consoante aos autores, o número de partículas que participam do contato dependem da distribuição estatística do tamanho das partículas e da probabilidade de uma partícula de determinado tamanho ficar presa na interface entre os corpos.

O atrito durante o contato de rolamento e interfaces lubrificadas pode ser afetado pela forma e quantidade de como o fluido é forçado para dentro da interface e pela rugosidade da superfície (BLAU 2001).

De acordo com Bogdanovich *et al* (2009), apenas uma pequena parte da energia dissipada pelo atrito produz desgaste (estima-se que seja inferior a 10%). A porção restante é dissipada principalmente como calor, embora outros mecanismos também contribuam, como emissão acústica, mudanças na rugosidade da superfície, formação de detritos de desgaste, processos triboquímicos e microestruturais.

Conforme Jiménez e Bermúdez (2011), o atrito e o desgaste estão intimamente relacionados, mas são fenômenos distintos. Ainda para os autores, os mecanismos de desgaste contribuem para o atrito, pois os processos de desgaste exigem a aplicação de força e consomem energia. Ao mesmo tempo, os mecanismos de desgaste são afetados pela carga de cisalhamento resultante do atrito e pelo aumento da temperatura causado pelo atrito, de modo que o atrito pode influenciar o comportamento do desgaste. Além disso, o comportamento do atrito pode ser influenciado pelas mudanças em uma superfície causadas pelo desgaste.

2.3.2 Desgaste

Para Budinski (1988), o desgaste é um dano a uma superfície sólida, geralmente envolvendo perda progressiva de material, devido ao movimento relativo entre essa superfície, e uma ou mais substâncias em contato. O desgaste costuma ser progressivo e é um efeito do sistema, ou seja, pode-se dizer que é sempre causada pela interação entre sólidos em movimento relativo ou pela ação mecânica de um fluido em movimento em relação a um sólido.

Em conformidade com Straffelini (2015), o desgaste pode causar falha direta, pode reduzir tolerâncias e acabamento superficial, ou induzir um dano superficial que é responsável pela falha subsequente do componente (na maioria das vezes por fadiga).

Conforme Zum Gahr (1987), os mecanismos de desgaste descrevem as interações energéticas e materiais entre os elementos de um tribossistema. O tipo de movimento relativo entre os corpos em contato também pode ser usado para classificar diferentes processos de desgaste.

Para Straffelini (2015), um desgaste de rolamento-deslizamento é obtido se os dois tipos de movimento forem sobrepostos. Quando um deslizamento alternativo está presente com deslocamento muito pequeno, o processo de desgaste resultante é chamado de *fretting*. Ainda segundo o mesmo autor, quando um dos dois corpos consiste em uma ou mais partículas duras que desgastam uma superfície mais macia, o desgaste é chamado de abrasão por material granular duro. Se um fluido carrega tais partículas abrasivas, o desgaste é chamado de erosão.

Apesar do elevado número de processos de desgaste encontrados na prática, a investigação de danos por desgaste é facilitada pela observação de que cada processo de desgaste é determinado pela ação de um mecanismo de desgaste predominante, sendo que os mecanismos de desgaste são apenas quatro: (1) desgaste adesivo; (2) desgaste triboquímico; (3) desgaste por fadiga de contato; (4) desgaste abrasivo (CZICHOS, 2018).

Consoante Jiménez e Bermúdez (2011), o desgaste adesivo é baseado na noção de que a adesão ocorre entre as asperezas quando elas se tocam, seguida pelo cisalhamento plástico das pontas das asperezas mais macias que então aderem à superfície oposta e, finalmente, separam-se como partículas de detritos de desgaste.

O desgaste adesivo pode ser descrito pelo modelo Archard, o qual sugere que, uma alta energia superficial deve resultar em uma alta taxa de desgaste do adesivo, pois as forças adesivas são maiores para alta energia superficial. Como a energia superficial depende da

composição química da superfície, as taxas de desgaste desse mecanismo adesivo devem ser muito sensíveis à presença de camadas de contaminação ou filme lubrificante (JIMÉNEZ e BERMÚDEZ, 2011).

A figura 7 ilustra o desgaste adesivo e a formação de detritos de desgaste.

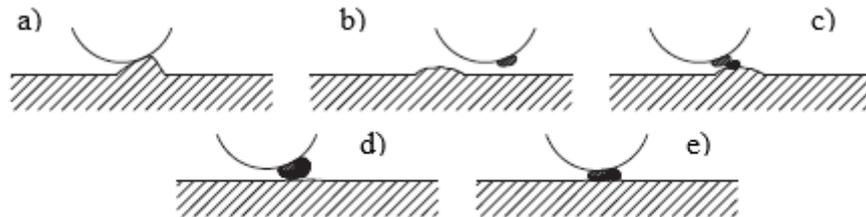


Figura 7 - Modelo para adesão, transferência de material e deformação plástica de detritos de desgaste.

Fonte: Adaptado de Jiménez e Bermúdez (2011).

Pode-se observar na figura 7a) o encontro entre as asperezas, e então a adesão entre as superfícies ocorre. Em 7b) ocorre o cisalhamento plástico do pico da superfície mais macia, que então fica aderida à outra superfície. Em 7c) e 7d) ocorre o processo análogo aos anteriores, porém agora a adesão de material se torna significativamente maior. Em 7e) há o despreendimento da adesão formada, gerando então os detritos de desgaste.

De acordo com Bhushan (2013), o desgaste triboquímico ou corrosivo ocorre quando o deslizamento ocorre em um ambiente corrosivo. No ar, o meio corrosivo mais dominante é o oxigênio. Portanto, o desgaste químico no ar é geralmente chamado de desgaste oxidativo. Na ausência de deslizamento, os produtos químicos da corrosão (óxidos), formam uma camada fina na superfície, que tende a diminuir ou até mesmo parar o processo de corrosão, entretanto o deslizamento entre as superfícies desgasta a película de óxido e então o ataque químico continua. Assim, o desgaste triboquímico requer tanto reação química (corrosão) quanto fricção.

Segundo Budinski (1988), o desgaste por fadiga de contato de uma superfície sólida é causado pela tensão cíclica produzida por rolamento ou deslizamento repetidos em uma superfície. Ainda para o autor, o exemplo mais comum de um sistema que seria propenso a essa forma de desgaste é uma pista de rolamento que é submetida a repetidos deslocamentos de uma esfera ou rolo. Neste caso, a remoção de material ocorreria por trincas sub superficiais. Uma cava seria produzida quando a trinca sub superficial progredisse para a superfície.

Para Czichos (1978), o desgaste abrasivo ocorre em situações de contato físico direto entre duas superfícies, onde uma das superfícies é consideravelmente mais dura que a outra. As

asperezas da superfície mais dura pressionam a superfície mais macia deformando plasticamente a mesma. Quando um movimento tangencial é imposto, a superfície mais dura se moverá, arando e removendo o material mais macio.

Conforme Jiménez e Bermúdez (2011), os dois tipos gerais de desgaste abrasivo são:

- Abrasão a dois corpos: o desgaste é causado pelas saliências duras de uma superfície na outra. As ferramentas de corte produzem desgaste abrasivo de dois corpos;
- Abrasão a três corpos: o desgaste é causado por partículas duras que deslizam entre duas superfícies deslizantes. Isso inclui a abrasão por detritos de desgaste gerados por outros mecanismos de desgaste.

A figura 8 ilustra a abrasão a dois e três corpos:

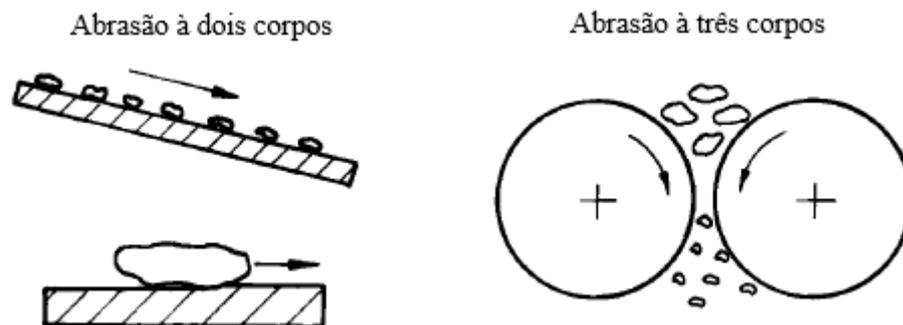


Figura 8 - Representação do desgaste abrasivo a dois e três corpos.
Fonte: Czichos (1978).

Pode-se exemplificar pela figura 8 a situação de abrasão a dois corpos como o transporte de minerais soltos, e para a abrasão a três corpos, sendo a presença de partículas estranhas nos rolamentos.

Em conformidade com Hutchings (1992), a taxa de desgaste estabelecida pelas partículas abrasivas presentes no sistema pode ser determinada pela equação de Archard para o desgaste abrasivo (Equação 1).

$$Q = \frac{KF}{H} \quad (1)$$

Na Equação 1, **Q** é a taxa de desgaste, que é o volume de material removido por unidade de distância de deslizamento $\left(\frac{mm^3}{m}\right)$. **K** mede a severidade do desgaste, cujo quanto maior for o seu valor, maior será a taxa de desgaste, (para o desgaste abrasivo por riscamento, **K** está entre 5×10^{-3} e 50×10^{-3} , para o desgaste abrasivo por rolamento, entre $0,50 \times 10^{-3}$ e 5×10^{-3}) e o mesmo é um valor adimensional sempre menor que 1 (HUTCHINGS, 1992). **F** é a força normal total aplicada sobre o sistema e **H** é a dureza do material desgastado.

Fazendo, $k = \frac{K}{H}$, e substituindo na Equação 1, a Equação de Archard para o desgaste abrasivo torna-se:

$$Q = k * F_n \quad (2)$$

Neste caso, o coeficiente de desgaste (k) pode ser entendido como o volume de material desgastado por unidade de força e por unidade de distância de deslizamento $\left(\frac{mm^3}{m}\right)$. Pode-se dizer, também, que k é a taxa de desgaste, considerando, além da distância de deslizamento, a força normal.

2.3.3 Lubrificação

Na visão de Stachowiak e Batchelor (2014), camadas finas de gás, líquido e sólido de baixa resistência ao cisalhamento são interpostas entre duas superfícies para melhorar a suavidade do movimento de uma superfície sobre a outra e evitar danos. O autor define lubrificação como conhecimento relacionado ao aprimoramento ou diagnóstico da eficácia desses filmes na prevenção de danos em contatos sólidos.

Os processos de lubrificação podem assumir muitas formas diferentes, dependendo da geometria geral dos corpos em contato, da rugosidade e textura das superfícies de deslizamento, da carga de contato, da pressão e temperatura, das velocidades de rolagem e deslizamento, das condições ambientais, das propriedades físicas e químicas do lubrificante, da composição do material e das propriedades da camada próxima à superfície (BLAU, 1992).

Embora não haja restrições quanto ao tipo de material necessário para formar um filme lubrificante, já que gases, líquidos e certos sólidos são todos eficazes, o tipo de material influencia os limites da eficácia do filme. Por exemplo, um filme gasoso é adequado para baixa tensão de contato, enquanto filmes sólidos são geralmente aplicados a contatos de baixa velocidade de deslizamento (STACHOWIAK, 2014).

Conforme Czichos (2018), as forças de atrito sob condições lubrificadas são principalmente menores do que aquelas de atrito sólido e dependem da resistência ao cisalhamento dos filmes de limite interfacial e da reologia do lubrificante. O autor ainda explica que o parâmetro tribológico básico de atrito e lubrificação λ é a relação adimensional entre a espessura (h) do filme e rugosidade (R). A curva de Stribeck caracteriza os principais regimes de atrito e lubrificação em função de λ da seguinte forma, vide figura 9:

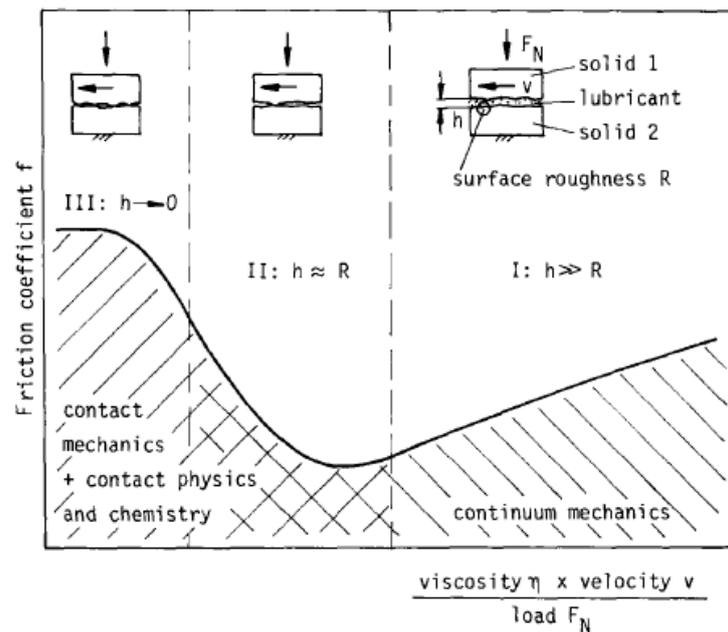


Figura 9 - Regimes de atrito e desgaste de um tribo-sistema: a curva de Stribeck.
Fonte: Adaptado de Czichos (1978).

- I. Atrito do fluido, $\lambda > 3$, o atrito é dominado pela reologia e hidrodinâmica do lubrificante;
- II. Atrito misto, $1 < \lambda < 3$, o atrito é uma coexistência de I e III;
- III. Atrito sólido/limite, $\lambda < 1$, o atrito é dominado por interações sólido/sólido e cisalhamento de filmes limites interfaciais.

Conforme observado na figura 9, dependendo da relação entre a espessura do filme e a rugosidade, três regimes diferentes de lubrificação podem ser distinguidos: (I) lubrificação hidrodinâmica, (II) lubrificação mista, (III) lubrificação limite.

Segundo Burstein (2011), o regime de lubrificação hidrodinâmica (I), $h \gg R$, ocorre quando o lubrificante separa completamente as superfícies e está principalmente associado a espessuras de filme próximas ou superiores a $1 \mu\text{m}$. As perdas por atrito sob lubrificação hidrodinâmica são muito pequenas e são menores do que em outros regimes de lubrificação.

Burstein (2011), ainda afirma que a pressão hidrodinâmica gerada no filme lubrificante devido ao movimento relativo e ao atrito interno do filme é muito baixa para causar deformação da superfície. O fluxo do filme lubrificante é laminar, mas em espessuras acima de $20 \mu\text{m}$ torna-se turbulento e isso leva a perdas por atrito indesejáveis.

Conforme Almqvist (2006), a lubrificação mista (II) é caracterizada pela carga que é transportada pela ação hidrodinâmica do lubrificante, que pode ser influenciada pela deflexão

elástica das superfícies, o tribofilme, diretamente pelas asperezas da superfície ou uma combinação destes. O autor também afirma que os objetivos da topografia da superfície são apoiar a ação hidrodinâmica do lubrificante, auxiliar a deflexão elástica tornando a superfície mais lisa, permitir a adesão dos aditivos tensoativos e otimizar o atrito nos pontos de contato sem aumentar o desgaste.

Para Bhushan (2013), a lubrificação limite (III) é aquela condição na qual as superfícies sólidas estão tão próximas umas das outras que a interação superficial entre filmes monomoleculares ou multimoleculares de lubrificantes (líquidos ou gases) e as asperezas sólidas dominam o contato, entretanto esse tipo de interação não se aplica a lubrificantes sólidos. Na ausência de lubrificantes e gases limítrofes (sem filmes de óxido), o atrito pode se tornar muito alto. Em todas as interfaces de rolamentos, durante o início e final da movimentação relativa entre as superfícies, operam no regime de lubrificação limite, antes que um filme de fluido hidrodinâmico seja desenvolvido.

2.4 Lubrificantes e processos de lubrificação

Segundo Stachowiak e Batchelor (2014), a função de um lubrificante é controlar o atrito e o desgaste em um determinado sistema. Os requisitos básicos, portanto, referem-se ao desempenho do lubrificante, ou seja, sua influência nas características de atrito e desgaste de um sistema.

Para Almqvist (2006), um lubrificante atende a vários objetivos cruciais; quando seu principal objetivo é diminuir o atrito, as ações dos aditivos são preocupantes. Se a interface estiver sujeita a desgaste excessivo, a capacidade do lubrificante de formar um filme separador torna-se ainda mais crucial.

Almqvist (2006), ainda afirma que, as propriedades de volume do lubrificante devem ser cuidadosamente escolhidas. Em alguma escala, independentemente do acabamento superficial, todas as superfícies reais são rugosas e sua topografia influencia a condição de contato.

Além da redução do atrito, os lubrificantes também retiram calor e partículas de desgaste e podem servir como meio de distribuição de inibidores de corrosão (BLAU 2009).

Stachowiak e Batchelor (2014), afirmam que a qualidade do lubrificante é um aspecto importante, o qual reflete sua resistência à degradação em serviço. Ainda segundo os autores, a maior parte da pesquisa atual sobre lubrificantes é dedicada ao estudo, prevenção e

monitoramento da degradação do óleo, uma vez que a vida útil de um óleo é tão importante quanto seu nível inicial de desempenho. Além de sofrer degradação em serviço, o que pode causar danos ao maquinário em operação, um óleo pode causar corrosão das superfícies de contato.

Para Torbacke *et al* (2014), as propriedades do lubrificante podem ser divididas em propriedades de desempenho, propriedades de longa vida útil e propriedades ambientais. Essas propriedades são colocadas em ovais no diagrama, em forma de linha do tempo, estendendo-se de um tempo inicial a um tempo final. Vide figura 10.

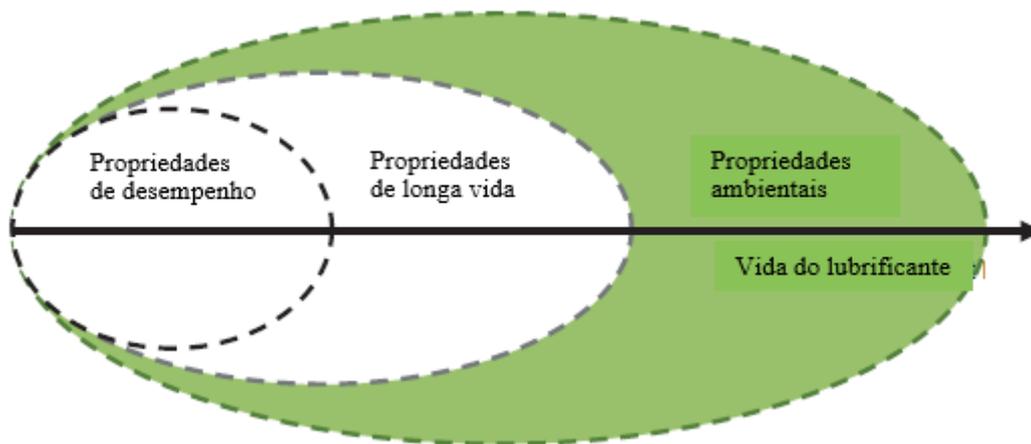


Figura 10 - Linha do tempo das diferentes propriedades dos lubrificantes.
Fonte: Adaptado de Torbacke et al (2014).

Pode-se observar na figura 10 que as propriedades de desempenho são centrais desde o momento em que o lubrificante é adicionado ao contato, essas propriedades garantem que os propósitos de lubrificação do contato tribológico sejam cumpridos, por exemplo: viscosidade, propriedades térmicas, propriedades de baixa e alta temperatura e sensibilidade ao contaminante do ar e da água.

As propriedades de longa vida, ou longevidade, segundo Torbacke *et al* (2014), estenderão a funcionalidade do contato lubrificado. Essas propriedades envolvem aspectos que aumentam a vida útil do lubrificante e do contato lubrificado, minimizando assim o risco de falha e necessidade de manutenção. As propriedades ambientais se estendem por muito tempo. Eles podem ter uma influência aguda nas pessoas ou no meio ambiente durante, por exemplo, derramamentos de óleo e vazamentos para ambientes sensíveis. Eles também podem ter uma influência por muito tempo em humanos ou no meio ambiente se o lubrificante for baseado, por exemplo, em substâncias bio-acumuláveis. As propriedades ambientais incluem o ambiente de trabalho e propriedades como biodegradabilidade, renovabilidade, toxicidade e bio-acumulação.

2.4.1 Viscosidade

Na visão de Purquério (1998), o efeito da resistência interna do fluido usado como lubrificante é definido como viscosidade. A viscosidade e suas dimensões são melhor explicadas com um modelo de camadas paralelas de fluido que podem ser visualizadas molecularmente, como ilustrado na figura 11.

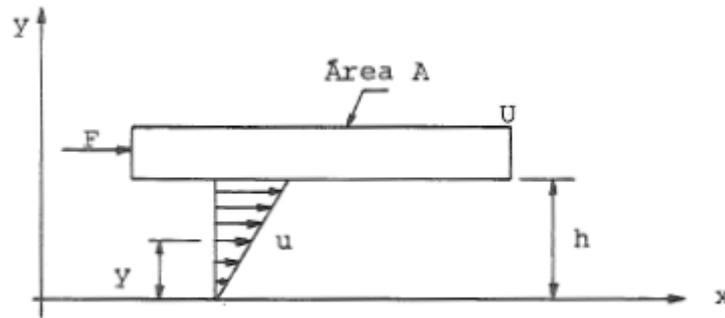


Figura 11 - Duas superfícies em movimento relativo, separadas por uma película de óleo em escoamento laminar, com um gradiente linear de velocidade.
Fonte: Adaptado de Purquério (1998).

Na figura 11, a superfície inferior é estacionária e a superior move-se para a direita com uma velocidade U . As duas superfícies paralelas são separadas por um lubrificante de espessura h .

Ainda na visão de Purquério (1998), quando duas superfícies, em movimento relativo são separadas por um lubrificante, tem-se então o escoamento do lubrificante. Na maioria dos casos de movimento relativos com lubrificação, o tipo do escoamento do lubrificante é considerado laminar. Nestas condições, pode-se dizer que existe uma perfeita adesão, isto é, a lamina imediatamente adjacente a superfície móvel movimenta-se com a mesma velocidade que esta, enquanto que a imediatamente adjacente a superfície estacionária tem velocidade zero. As laminas intermediárias movem com velocidades variando linearmente de 0 a U .

Como as camadas laminares tem velocidade diferente, cada camada desliza sobre a adjacente, com isso uma força F é necessária para produzir este deslizamento. A resistência que o fluido oferece a esta força é conhecida como tensão de cisalhamento, a qual produz o atrito fluido (PURQUÉRIO, 1998).

Para Maru (2003), a viscosidade pode ser expressa em termos de viscosidade cinemática (em $[\text{mm}^2/\text{s}]$ ou $[\text{cSt}]$) ou viscosidade absoluta (ou dinâmica, em $[\text{Pa}\cdot\text{s}]$).

Hutchings (1992) definiu a viscosidade em fluidos newtonianos, em termos da deformação por cisalhamento γ , conforme a equação (3):

$$\tau = \eta * \frac{d\gamma}{dt} \quad (3)$$

Em que:

τ : tensão de cisalhamento [Pa];

η : viscosidade dinâmica [Pa.s];

$d\gamma/dt$: taxa de deformação por cisalhamento;

Ainda segundo Hutchings (1992) a viscosidade cinemática Z é definida:

$$Z = \frac{\eta}{\rho} \quad (4)$$

Sendo:

Z : viscosidade cinemática [mm²/s] ou [cSt];

ρ : massa específica [kg/m³];

Para Torbacke *et al* (2014), a propriedade de desempenho mais importante de um lubrificante é a viscosidade, pois a mesma determina a espessura do filme lubrificante e, portanto, o desempenho do contato lubrificado.

Segundo Stachowiak e Batchelor (2014), aparentemente os óleos mais viscosos teriam melhor desempenho, pois os filmes gerados seriam mais espessos e uma melhor separação das duas superfícies em contato seria alcançada. Ainda na visão dos autores, isso nem sempre ocorre, pois óleos mais viscosos exigem mais potência para serem cisalhados, consequentemente as perdas de energia são maiores e mais calor é gerado resultando em um aumento substancial na temperatura das superfícies de contato, o que pode levar à falha do componente. Portanto, o conhecimento das características de viscosidade de um lubrificante é importante no projeto e na previsão do comportamento de um sistema mecânico lubrificado.

2.4.2 Tipos de lubrificantes

Conforme Purquério (1998), os lubrificantes dividem-se em quatro principais classes: sólidos, semissólidos, líquidos e gasosos.

2.4.2.1 Lubrificantes sólidos

Sliney (1992), define os lubrificantes sólidos como filmes finos compostos por um único sólido ou uma combinação de sólidos introduzidos entre duas superfícies em atrito com o objetivo de reduzir o atrito e o desgaste.

Busch (2007) afirma que os lubrificantes sólidos são necessários para a lubrificação em condições extremas, onde as superfícies de contato tribológico precisam ser efetivamente separadas. Sliney (1992) caracteriza o uso de lubrificantes sólidos em aplicações ou operações que envolvem temperaturas, pressões e ambientes severos que impedem o uso de fluidos orgânicos.

Para Ahmed e Nassar (2013), os lubrificantes sólidos normalmente possuem uma estrutura cristalina em camadas que garante baixa resistência ao cisalhamento, minimizando assim o atrito. Como a resistência ao cisalhamento entre as camadas cristalinas é fraca, portanto, é estabelecido um mecanismo de baixo atrito por meio do deslizamento das camadas sob baixas forças de cisalhamento. Ainda na visão dos autores, são exemplos de lubrificantes sólidos, o bissulfeto de molibdênio, grafite, nitreto de boro, iodeto de cádmio e borax. Os lubrificantes sólidos são usados principalmente na forma de pós ou como filmes sólidos ligados.

Segundo Sliney (1992), outra propriedade importante é a baixa abrasividade. Essa é uma propriedade relativa que é função da relação de dureza entre o lubrificante e o material do rolamento. Obviamente, as partículas do lubrificante devem ser mais macias do que o material do rolamento para evitar o desgaste abrasivo.

Ahmed e Nassar (2013) afirmam que, um bom filme de lubrificante sólido possui uma forte aderência ao material do substrato de rolamento, cobertura total da superfície e boa maleabilidade. Ele também deve ser quimicamente estável e prevenir a corrosão, levando em consideração as condições operacionais e ambientais.

Por fim, Sliney (1992) determina que o lubrificante sólido deve ser termodinamicamente estável no ambiente de aplicação. A consideração dessa propriedade é importante ao selecionar lubrificantes sólidos para aplicações em alta temperatura, mas também é igualmente importante para aplicações em temperatura moderada, a fim de garantir adequada estabilidade de armazenamento e evitar corrosão por componentes atmosféricos, como oxigênio e pulverização de sal.

2.4.2.2 Lubrificantes Semissólidos

Na visão de Purquério (1998), os lubrificantes semissólidos são compostos principalmente das graxas, as quais são feitas de uma combinação de gorduras e óleos engrossadas com sabões de cálcio ou sódio.

Já para Dresel e Heckler (2007), as graxas lubrificantes podem ser definidas como produtos sólidos a semissólidos fabricados a partir da dispersão de um agente espessante em

um lubrificante líquido. Geralmente, elas contêm compostos adicionais para conferir propriedades especiais, sendo o agente espessante geralmente um sabão metálico.

A graxa consiste, conforme Boehring (1992), em agente espessante, óleos básicos e aditivos. O óleo base é o lubrificante primário, embora os aditivos influenciem significativamente no desempenho da graxa. A maioria dos agentes espessantes não contribui para a lubrificação, com exceção do sabão de cálcio.

A função de uma graxa, de acordo com Boner (1955), é permanecer em contato com as superfícies em movimento sem vazar sob ação da gravidade ou centrifugação, nem ser expelida sob pressão. Sua principal exigência prática é que ela mantenha suas propriedades sob cisalhamento em todas as temperaturas a que possa ser submetida durante o uso. Ainda na visão do autor, a graxa deve ser capaz de fluir para o rolamento através de bombas de graxa e se deslocar de um ponto a outro na máquina lubrificada, conforme necessário. Mas não deve adicionar significativamente à potência requerida para operar a máquina, especialmente na partida.

Segundo Stachowiak e Batchelor (2014), as graxas devem atender aos mesmos requisitos dos óleos lubrificantes, mas com uma condição extra: a graxa deve permanecer como uma massa semissólida, mesmo em altas temperaturas de serviço. Se a graxa liquefice e se afasta do contato, a probabilidade de falha na lubrificação aumenta rapidamente.

Landstown (1996) listou algumas vantagens do uso de graxa como lubrificante em relação aos óleos: graxas não possuem problemas de partida e parada, apresentam melhor desempenho em condições de filme de compressão, resolvem problemas de vedação, fornecem lubrificante excedente sem necessidade de design especial, ajudam a evitar a contaminação de produtos limpos e as graxas permitem o uso de aditivos sólidos.

Em contrapartida, Dresel e Heckler (2007), pontuam que, as graxas têm apenas duas desvantagens: não são a escolha adequada quando o problema é transferência de calor e possuem um limite de velocidade mais baixo devido à sua maior viscosidade efetiva. Uma terceira desvantagem, mais teórica, é que, devido ao seu caráter iônico geralmente mais pronunciado e maior superfície, elas são mais suscetíveis à oxidação do que os óleos.

2.4.2.3 Lubrificantes Líquidos

Fein (1992) define que, a função primária dos lubrificantes líquidos é controlar o atrito, o desgaste e os danos superficiais ao longo da vida útil pretendida de um sistema que contém elementos de máquinas, como engrenagens e rolamentos. O desgaste e os danos superficiais

ocorrem em condições de lubrificação de limite ou parcial de limite, mas não em condições hidrodinâmicas completas. Ainda segundo o autor, funções secundárias são prevenir a corrosão e remover o calor, a sujeira e os resíduos de desgaste. Os lubrificantes também podem transferir força ou energia, como ocorre em sistemas hidráulicos.

Conforme Bhushan (2013), os lubrificantes líquidos (óleos) são fabricados a partir de materiais orgânicos naturais, como gordura animal, óleos vegetais, frações minerais (ou derivados de petróleo), orgânicos sintéticos e misturas de dois ou mais desses materiais. Diversos aditivos são utilizados para melhorar propriedades específicas.

De acordo com Stachowiak e Batchelor (2014), os óleos minerais são os lubrificantes mais comumente utilizados. Eles são fabricados a partir do petróleo bruto. Ainda segundo os autores, existem certas vantagens e desvantagens ao aplicar óleo mineral para lubrificar máquinas específicas, e essas devem ser cuidadosamente consideradas ao selecionar um lubrificante e projetar um sistema de lubrificação. O custo dos óleos minerais é baixo e, mesmo com o rápido desenvolvimento de óleos sintéticos, lubrificantes sólidos e polímeros resistentes ao desgaste, seu uso é amplamente difundido em muitas indústrias.

Bhushan (2013) descreve que, a demanda por lubrificantes de melhores desempenho foi criada principalmente pelos avanços na aviação, inicialmente devido aos requisitos de velocidades mais altas e desempenho de motores a turbina de gás. Essa demanda levou ao desenvolvimento de lubrificantes sintéticos que podem resistir a ambientes com extremos de temperatura e pressão, alto vácuo e alta umidade. Os lubrificantes sintéticos podem ser usados em temperaturas de até 370°C e até 430°C por períodos curtos. No entanto, eles são mais caros do que os óleos minerais.

Para Rizvi (1992), lubrificantes não tratados, ou não formulados (óleos à base de minerais e óleos sintéticos), não possuem as propriedades necessárias para serem eficazes nos ambientes de lubrificação exigentes que existem atualmente. Para desempenhar adequadamente as funções mencionadas anteriormente, os fluidos básicos precisam da ajuda de aditivos químicos.

Ainda na visão de Rizvi (1992), os aditivos de lubrificantes podem ser amplamente categorizados como sendo quimicamente ativos ou quimicamente inertes. Os aditivos quimicamente ativos, como dispersantes, detergentes, agentes antidesgaste e extrema pressão (EP), inibidores de oxidação e inibidores de ferrugem e corrosão têm a capacidade de interagir

quimicamente com os metais (formando um filme protetor) e com os produtos de oxidação e degradação polar (tornando-os inofensivos). O autor também define que, os aditivos quimicamente inertes, melhoram as propriedades físicas essenciais para o desempenho eficaz do lubrificante, incluem emulsificantes, desemulsificantes, depressores de ponto de fluidez, inibidores de espuma e melhoradores de viscosidade.

2.4.2.4 Lubrificantes Gasosos

Segundo Ahmed e Nassar (2013), os lubrificantes gasosos pertencem aos lubrificantes mais simples e de menor viscosidade conhecidos e incluem ar, nitrogênio, oxigênio e hélio. São aplicados em rolamentos aerodinâmicos e aerostáticos.

Ainda de acordo com Ahmed e Nassar (2013), as propriedades químicas e o estado agregado da maioria dos gases permanecem inalterados em uma ampla faixa de temperatura. Os lubrificantes gasosos oferecem várias vantagens sobre os lubrificantes líquidos. Primeiro, eles podem ser aplicados em temperaturas muito altas e muito baixas. Sua estabilidade química elimina qualquer risco de contaminação do rolamento pelo lubrificante, importante para as máquinas utilizadas em diversos ramos da indústria, principalmente nas indústrias alimentícia, farmacêutica e eletrônica.

2.5 Condicionadores de metais

Segundo Calabokis *et al.* (2022), os condicionadores de metal são agentes redutores de atrito, desgaste e redutores de temperatura entre componentes metálicos em movimento e são usados principalmente em motores e caixas de transmissão como aditivos de reposição.

Na visão de Silva (2014), o condicionador metálico não é considerado como um aditivo para fluidos. Mesmo possuindo viscosidade similar à dos fluidos sintéticos, porém adicioná-lo a qualquer fluido não se altera nenhuma de suas propriedades físico-químicas e nem o intervalo de substituição do fluido.

O condicionador metálico pode ser considerado como uma nova ferramenta líquida moderna para lubrificação em sistemas em que o atrito for o fator dominante. Pode ser aplicado na indústria automobilística na fabricação de automóveis e também por proprietários de veículos junto aos fluidos de seus respectivos veículos. Além da indústria automotiva, o condicionador pode ser usado em qualquer ramo industrial ou sistema, que se necessite reduzir atrito (DE OLIVEIRA *et al.*, 2014).

No estudo realizado por Calabokis *et al.* (2022), observa-se que, a adição de condicionador metálico (mistura 25:1) no cárter de uma motocicleta e no condicionamento de algumas peças (80 °C, 90 min) antes da montagem do motor, vantagens em termos de proteção dos componentes de alumínio e ferro durante os 15.000 km, o que é relevante porque o teor de alumínio foi encontrado acima dos limites de advertência apresentados na literatura para a motocicleta lubrificada com SAE 10W-30 puro. No entanto, a adição de condicionador metálico aumentou o desgaste (ppm/km) das peças metálicas de cobre, embora em níveis abaixo dos limites de advertência.

Ainda segundo Calabokis *et al.* (2022), a lubrificação da transmissão (coroa, pinhão e corrente de roletes) com condicionador metálico garantiu leve desgaste e maior vida útil para todos os seus componentes. Além disso, aumentou significativamente a resistência ao desgaste na engrenagem nº 5. Com isso os resultados indicam que alguns aditivos de reposição podem melhorar o desempenho geral dos lubrificantes sem efeitos colaterais indesejados nas condições testadas em laboratório e em campo.

2.6 Abrasômetro ASTM G65 – 16

Um dos métodos mais comuns de simular o desgaste abrasivo é mostrado na figura 12.

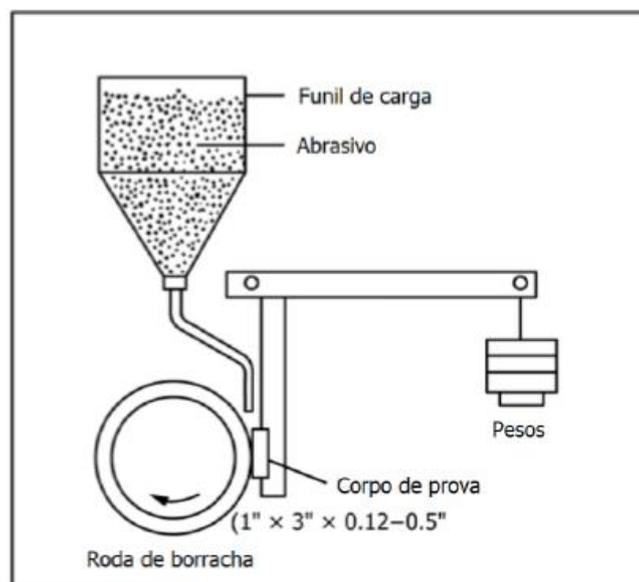


Figura 12 - Abrasômetro do tipo de roda de borracha.
Fonte: Adaptado da Norma ASTM G65-16 (2016).

A figura 12 mostra como é o funcionamento do equipamento que simula o desgaste abrasivo a 3 corpos proposto pela norma ASTM G65-16 (2016).

A amostra a ser ensaiada devem ser retangulares e são preparadas dentro das especificações da norma, suas dimensões devem atender 25x76mm e com espessura entre 3,2 e 12,7mm. Uma carga é aplicada sobre ela para que fique sempre em contato com um disco de borracha acoplado a um motor elétrico que ao girar é despejado um tipo de abrasivo por gravidade que simula o desgaste abrasivo a 3 corpos citados anteriormente no trabalho. Este ensaio é normalizado pela Norma Americana: *American Standards of Testing Materials, ASTM, (ASTM G65 – Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus)*.

De acordo com a norma ASTM G65 (2016), o disco é feito de um aro de borracha, com dureza já definida, é moldado sobre a superfície curva de um disco de aço. Tanto a largura, como a espessura da borracha devem ser de 12,7 mm (1/2”) e o diâmetro total de 228,6 mm, que também vai se desgastando à medida que ocorrem os ensaios, quando esse diâmetro atingir 215,9mm o disco deve ser substituído por um novo. O disco ou a roda gira com uma rotação constante de 200 RPM com variação permitida de ± 10 RPM, e um fluxo de abrasivo é direcionado entre a face da roda e da amostra, com vazão compreendida numa faixa entre 300 e 400 g/min (ASTM G65, 2016).

O tipo de abrasivo deve ser um grão de areia arredondado de quartzo. O teor de umidade não deve exceder 0,5% em peso. A areia que foi exposta à umidade ou a uma umidade relativa continuamente alta pode absorver umidade, o que afetará os resultados dos testes (ASTM G65, 2016).

Antes de cada ensaio, as amostras devem ser pesadas, utilizando-se uma balança com precisão de 0,001 gramas. Ao final do ensaio sua superfície deve ser limpa e novamente pesada. A diferença entre as massas final e inicial serve para calcular o volume de material perdido pela amostra durante o ensaio, utilizando a equação 3 (ASTM G65, 2016).

$$Volume\ perdido\ [mm^3] = \frac{massa\ perdida\ [g]}{densidade\ [\frac{g}{cm^3}]} \times 1000 \quad (5)$$

Como também ocorre um desgaste da borracha que recobre o disco, o diâmetro externo da roda deve ser medido antes e depois de cada ensaio, para que o volume perdido calculado na equação 1 possa ser corrigido. Para esta correção, utiliza-se a equação 2:

$$Volume\ perdido\ ajustado\ [mm^3] = \frac{Diametro\ da\ roda\ [mm]}{Diametro\ após\ ensaio\ [mm]} \times Volume\ perdido\ [mm^3] \quad (6)$$

Dentre os procedimentos de ensaio tabelados pela norma ASTM G65 existem 5 modelos de ensaios a serem escolhidos a depender do tipo de ensaio a ser realizado, os parâmetros a

serem analisados são a carga aplicada na amostra, o tempo de ensaio e a distância da abrasão linear ocasionado pela roda de borracha. É possível analisar os parâmetros de teste pela tabela 1.

Tabela 1 - Procedimentos de ensaio ASTM G65-16.

Procedimento Especificado	Força contra o corpo de prova, N (lb)	Revoluções da roda	Abrasão Linear	
			[m]	[ft]
A	130 (30)	6000	4309	14138
B	130 (30)	2000	1436	4711
C	130 (30)	100	71.8	236
D	45 (10.1)	6000	4309	14138

Fonte: Adaptado de ASTM G65-16 (2016).

Após o término do ensaio ASTM G65-16, é necessário comparar a marca de desgaste apresentada no corpo de prova ensaiado com o padrão estabelecido pela norma, conforme a figura 13.

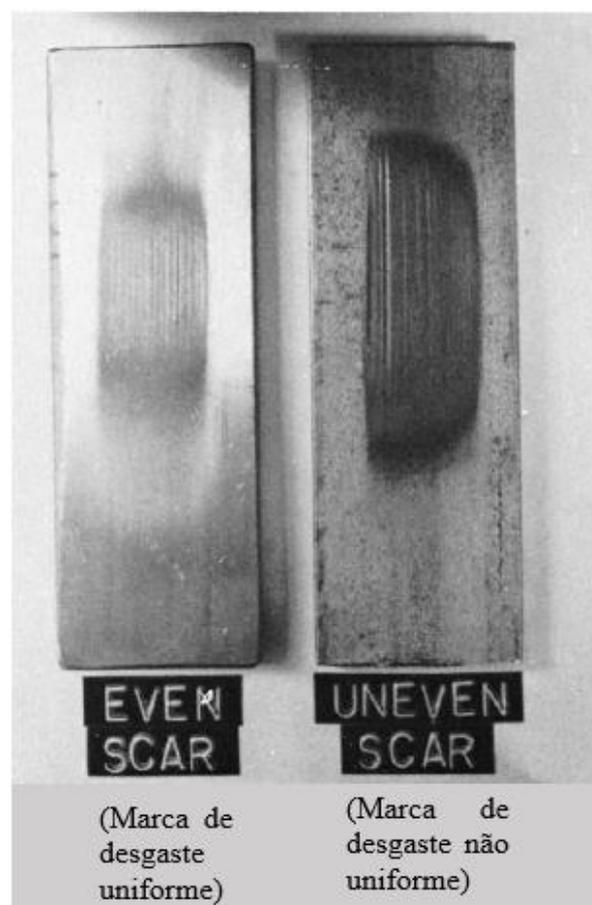


Figura 13 - Marcas de desgaste uniformes e irregulares.
Fonte: Adaptado de ASTM G65-16 (2016).

Pode ser observado na figura 13 os corpos de prova com as marcas de desgaste, sendo à esquerda o corpo de prova com cicatriz de desgaste uniforme e à direita com cicatriz de desgaste não uniforme ou irregular. Um padrão não uniforme indica um alinhamento incorreto da borda de borracha com o espécime de teste ou uma roda de borracha desbalanceada. Essa condição pode reduzir a precisão do teste.

3 METODOLOGIA

O presente capítulo tem como objetivo demonstrar as atividades realizadas no desenvolvimento da pesquisa, desde a identificação e preparação do corpo de prova, caracterização do lubrificante ao ensaio abrasivo descrito pela norma ASTM G65-16 (2016) e análise dos resultados obtidos. Para Assis (2021), a metodologia corresponde à explicação meticulosa, detalhada e exata de toda ação elaborada e de tudo o que foi utilizado no trabalho de pesquisa.

3.1 Tipo de pesquisa

Na visão de Vergara (2010), a pesquisa pode ser dividida em duas formas de abordagem, o método qualitativo e o método quantitativo.

Pesquisa qualitativa: Para Gil (2002), alguns *softwares* podem fazer parte da análise qualitativa, mas o elemento humano é fundamental para o desenvolvimento de um processo. Já para Vergara (2010), a abordagem qualitativa interpreta em números as opiniões e informações, utilizando técnicas estatísticas para serem classificadas e analisadas.

Pesquisa quantitativa: Conforme Gil (2002), métodos estatísticos que caracterizam por razoável grau de precisão são classificados com quantitativos. Mediante a utilização de teste estatísticos, torna-se possível determinar, em termos numéricos, a probabilidade de acerto de determinada conclusão, bem como a margem de erro de um valor obtido.

Para Vergara (2010), os tipos de pesquisa são classificados quanto aos seus meios e fins, as tabelas 2 e 3 apresentam uma melhor visualização e entendimento acerca do assunto.

Tabela 2 - Tipos de finalidades de pesquisas.

Exploratória	Pouco conhecimento sobre o assunto a ser pesquisado
Descritiva	Descrever determinada população ou fenômeno
Explicativa	Explicar determinado fenômeno
Metodológica	Sua base é a construção de um caminho ou modelo
Aplicada	Resolução de problemas existentes
Intervencionista	Resolver o problema

Fonte: Adaptado de Vergara (2010).

Tabela 3 - Tipos de meios para pesquisa

Campo	Realizada no local da ação
Laboratório	Realizado em ambiente controlado
Documental	Baseada em documentos
Bibliográfica	Material já publicado, livros, jornais, revistas
Experimental	Análise e observação em ambientes controlados
<i>Ex post facto</i>	Fato já ocorrido
Participante	Pesquisador é sujeito da pesquisa
Pesquisa-ação	Participação através da intervenção
Estudo de caso	Estudo profundo e detalhado de determinada unidade, empresa, pessoa, etc.

Fonte: Adaptado de Vergara (2010).

Com base na bibliografia sobre metodologia de pesquisa, o presente trabalho pode ser considerado de natureza qualitativa. Quanto aos procedimentos técnicos utilizados é caracterizada como bibliográfica, descritiva, explicativa e experimental, por utilizar referencial teórico para se entender os fenômenos envolvidos na interface e movimento relativo entre o corpo de prova e o lubrificante contaminado. Exploratória e descritiva, pois busca levantar e analisar dados referentes ao condicionador de metais e sua eficácia no aumento da resistência ao desgaste em casos práticos. A pesquisa pode, também, ser considerada experimental, por contemplar análise da resistência do Condicionador de metais ao desgaste abrasivo.

3.2 Materiais e métodos

Para realização dos ensaios de desgaste abrasivo em roda de borracha, seguindo a norma ASTM G65-16, fez-se necessário a aquisição de amostras de aço, as quais foram obtidas em um tambor de sucata do laboratório de Metalurgia da UFOP.

Em seguida foi realizado o procedimento experimental de caracterização e classificação quanto ao tipo de aço das amostras, foram utilizados máquina de corte, politriz para micrografia, resina para embutimento, microscópio óptico e durômetro.

Posteriormente, foi realizado a preparação dos dois corpos de prova que seriam submetidos ao ensaio de desgaste abrasivo. Foram utilizados também máquina de corte, politriz para micrografia, rugosímetro e balança de precisão de 0,001g.

Então, os corpos de prova foram lubrificados, sendo um deles com graxa à base de sabão de lítio e o outro corpo de prova fora lubrificado puramente com o condicionador de metais.

A norma ASTM G65-16 propõe um equipamento para ensaios de desgaste abrasivo, onde a amostra é disposta num plano vertical e forçada horizontalmente contra um disco de borracha que gira a uma rotação constante de $200 \text{ RPM} \pm 10$, ao mesmo tempo em que um abrasivo é direcionado para passar entre as superfícies da amostra e do disco de borracha, causando assim o desgaste do corpo de prova.

O próximo passo o peneiramento do abrasivo no qual foi utilizado areia com alto teor de sílica, em torno de 90%. Após a caracterização do abrasivo, amostras foram submetidas ao ensaio, sendo pressionadas contra a roda de aço com bordas de borracha sobre uma força de 130N e uma vazão do abrasivo em torno de 300g/min a 400g/min, conforme o bocal normatizado.

Ao finalizar a abrasão das amostras, elas são limpas com álcool para retirar pequenas partículas de areia e o excesso do lubrificante presas à superfície do aço, para então serem pesadas. Após a obtenção do peso, pós ensaio, é feita uma subtração das massas inicial e final, e o valor obtido é usado para cálculo do volume perdido. Após o cálculo do volume perdido, o valor é utilizado na equação [1] de Archard para obter o coeficiente de desgaste do aço.

Após a análise dos resultados e a comparação dos valores mencionados na norma ASTM G65, é possível validar o ensaio.

Os procedimentos metodológicos utilizados para realização dos ensaios estão detalhados pela figura 14.

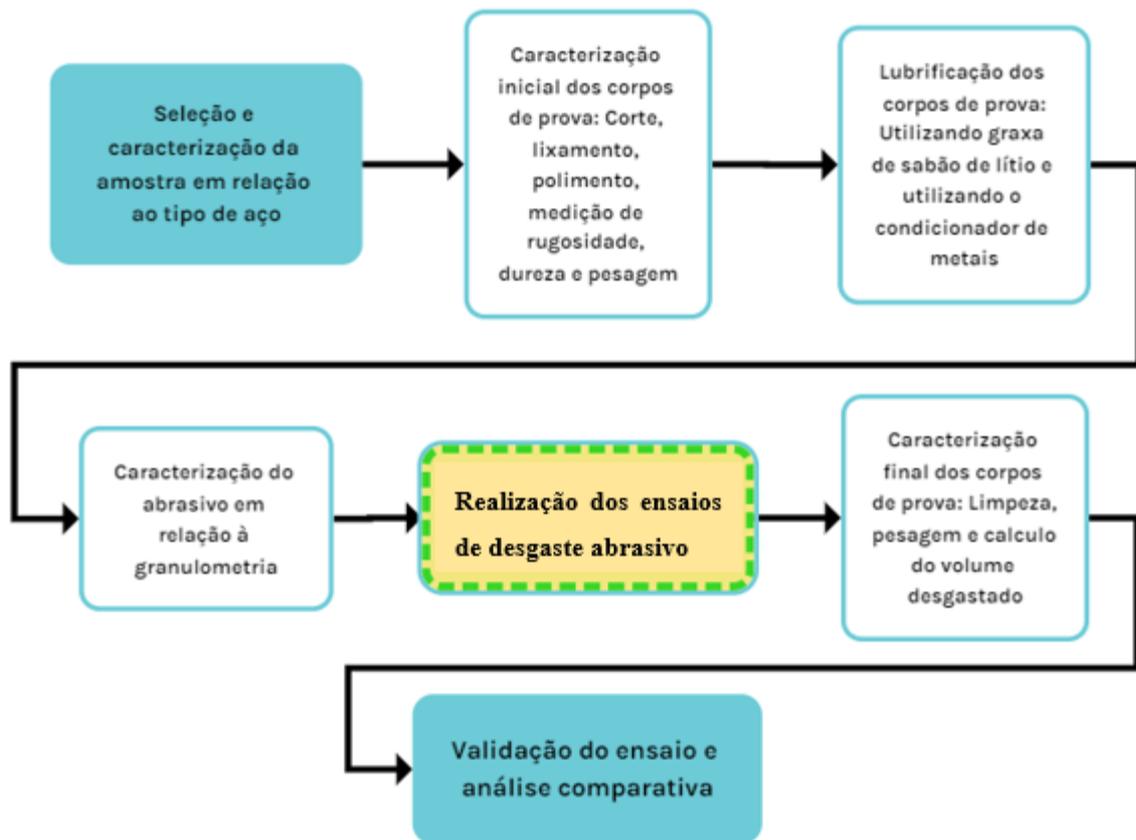


Figura 14 - Fluxograma do procedimento experimental.
 Fonte: Pesquisa direta (2023).

Na tabela 4 tem-se os instrumentos e materiais utilizados para a realização do trabalho.

Tabela 4 - Instrumentos e materiais utilizados

Instrumentos	Materiais
Abrasômetro ASTM G65-16	Condicionador de metais
Balança de precisão	Graxa de lítio
Durômetro Vickers	Abrasivo areia brasileira (IPT) n. 100
Máquina de corte	Corpo de prova em aço SAE 1020
Pirômetro	Resina acrílica
Soprador térmico	Lixas
Politriz metalográfica	Boina de polimento

Fonte: Pesquisa direta (2022).

3.3 Variáveis e indicadores

Nesse tópico estão listados as variáveis e seus respectivos indicadores utilizados na realização do ensaio de desgaste abrasivo para se obter os resultados apresentados no capítulo 4, como é mostrado na tabela 5.

Tabela 5 - Variáveis e indicadores utilizados.

Variáveis	Indicadores
Dureza do corpo de prova aço	Dureza Vickers HV
Peso	g
Volume	mm ³
Rugosidade	µm
Temperatura do corpo de prova e lubrificante	°C
Coefficiente de desgaste	Adimensional
Taxa de desgaste	mm ³ /m
Vazão do abrasivo	g/min
Tempo	Segundos
Carga aplicada	130 N
Rotação da roda de borracha	210 rpm
Revolução	6000 ciclos
Distância de deslizamento	4309 m
Tipo de desgaste	Abrasivo a 3 corpos

Fonte: Pesquisa direta (2022).

3.4 Instrumentação e coleta de dados

Esse tópico consiste em determinar os instrumentos utilizados na pesquisa para aquisição de dados.

O levantamento dos dados foi adquirido pelo estudo de artigos, dissertações, livros, revistas técnicas e teses, além da observação direta dos fenômenos do desgaste. Utilizando-se a norma ASTM G65-16 (2016) foram obtidos os dados técnicos do ensaio abrasivo e dos

materiais utilizados. Com a pesquisa direta levantou-se os dados do material do corpo de prova e do lubrificante utilizado.

3.5 Tabulação e análise de dados

Para tabulação dos dados foi utilizado o programa Microsoft Excel para criação de tabelas e gráficos.

Para comparação e análise dos dados foi utilizado a equação de Archard e equações da norma ASTM G65-16 (2016) para cálculo do volume perdido.

3.6 Considerações finais

Nesse capítulo foi apresentado o tipo de pesquisa e metodologia utilizados, os materiais e métodos para o processo experimental, as variáveis e indicadores que serão usados em laboratório, instrumentação e coleta de dados assim como o software utilizado para fazer as análises comparativas e conclusões dos resultados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O capítulo atual contempla os procedimentos experimentais realizados, para a obtenção dos dados necessários para que os objetivos geral e específicos sejam alcançados.

4.1 Seleção e preparação das amostras para ensaio de resistência ao desgaste no equipamento ASTM G65-16 (2016)

O material utilizado nos corpos de prova foi obtido em um tambor de sucatas do laboratório de Metalurgia da UFOP, porém não era sabido a classificação do aço. Portanto, foi necessário a realização de um ensaio de micrografia do material para determinação do teor de carbono e então a sua classificação quanto à norma SAE.

Inicialmente, foi realizado o corte do material para embutir em resina e possibilitar o processo de preparação de superfície (lixamento e polimento). A figura 15 ilustra o processo de corte da amostra.



Figura 15 - Amostra em processo de corte.
Fonte: Pesquisa direta (2023).

Na figura 15 é possível observar o processo de corte sendo realizado na máquina disponível do Laboratório de Metalografia e Ensaio Mecânicos do Departamento de Engenharia Mecânica da UFOP.

Finalizado o processo de corte da amostra, é necessário realizar o embutimento, a amostra cortada é colocada em um molde e é despejada sobre a mesma a resina para embutimento. A figura 16 demonstra a amostra após o processo.

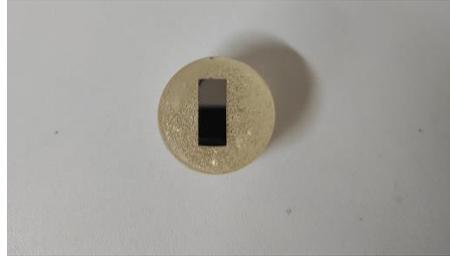


Figura 16 - Amostra embutida em resina.
Fonte: Pesquisa direta (2023).

A amostra embutida em resina após o tempo de cura pode ser observada na figura 16.

Após o embutimento, as amostras foram lixadas em uma politriz metalográfica, vide figura 17, onde foram utilizadas lixas de números 180, 220, 320, 400, 600, 800, 1000 e 1200. Durante o processo de lixamento, a cada troca de lixa a amostra era rotacionada em 90° para que o processo tivesse acabamento uniforme. Para finalização do acabamento da amostra, foi realizado polimento em duas etapas, usando aluminas de 1 micrón e de 0,05 micrón de granulometria.



Figura 17 - Politriz metalográfica.
Fonte: Pesquisa Direta (2023).

Na figura 17 é possível observar a politriz utilizada para o lixamento e polimento das amostras, a qual realiza o tratamento da superfície da amostra.

A próxima etapa foi o ataque químico da área a ser visualizada no microscópio óptico. Foi utilizado o Nital 3%, o qual reage com o material, permitindo a visualização da microestrutura do material. Vide figura 18 com a imagem da microestrutura da amostra.

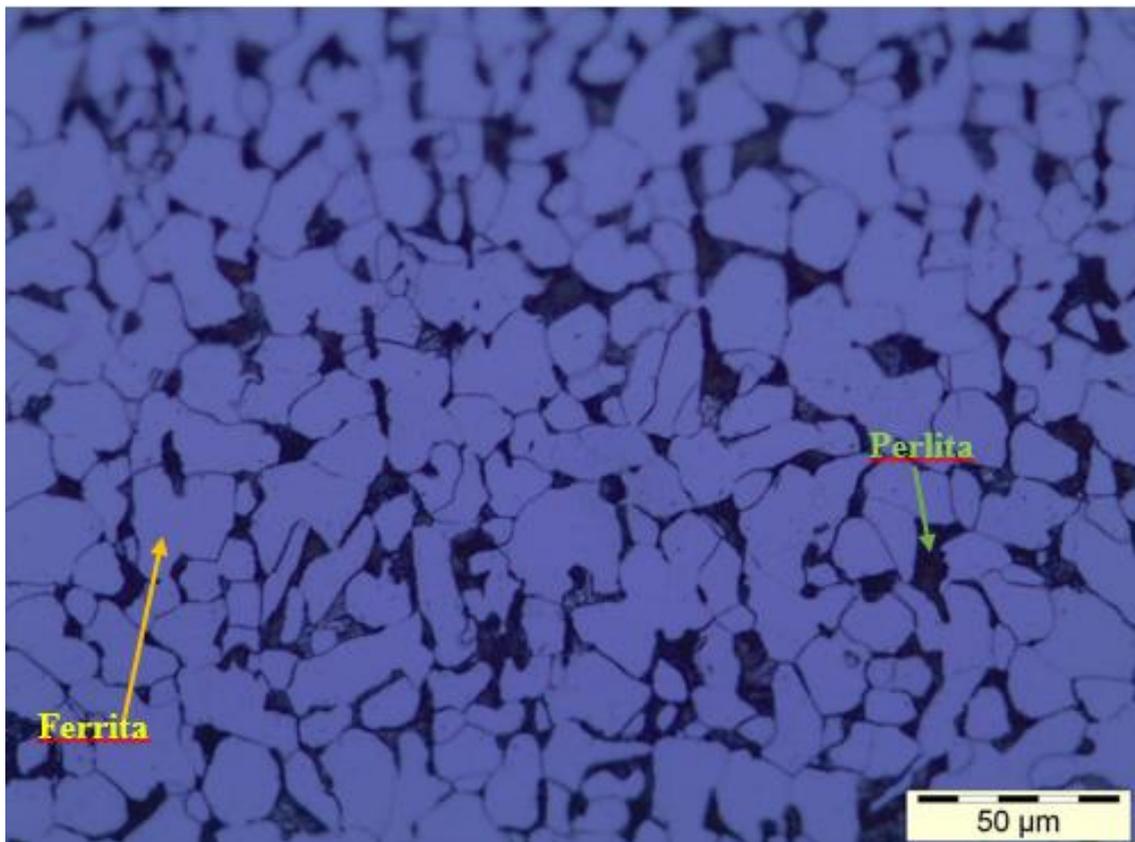


Figura 18 - Microestrutura da amostra ampliada em 500 vezes.
Fonte: Pesquisa direta (2023).

É possível visualizar na figura 18 os contornos de grão da microestrutura do aço, onde os contornos escuros são denominadas perlitas (maior concentração de carbono) e os claros são chamados de ferrita. Portanto pode-se definir que o aço possui matriz ferrítica, devido à maior concentração de ferrita.

Após a visualização da microestrutura do material, foi possível identificar que o aço usado possui microestrutura característica de um aço SAE 1020, esse material é amplamente utilizado em componentes mecânicos. Esse tipo de aço contém um teor de carbono de 0,2% que é conhecido na indústria por ser de fácil usinabilidade, alta tenacidade e baixa dureza possuindo uma baixa resistência ao desgaste abrasivo.

A última etapa da caracterização do aço da amostra foi a realização do ensaio de dureza Vickers, utilizando um durômetro Emcotest. Usando um indentador de diamante, foi aplicada uma carga definida fazendo uma penetração da amostra em formato de losango, suas diagonais são medidas para definir o valor da microdureza na superfície das amostras. Foram realizados três testes nas duas amostras, as quais apresentaram um valor médio de 132,8 HV5. A figura 19 representa o durômetro utilizado no ensaio.



Figura 19 - Durômetro Emcotest.
Fonte: Pesquisa direta (2023).

Pode-se ver na figura 19 o durômetro utilizado para medição da dureza superficial da amostra de aço SAE 1020 utilizado na atual pesquisa.

Finalizado o procedimento de caracterização do aço dos corpos de prova, foi iniciado o processo de preparação da superfície dos mesmos para realização do ensaio de desgaste abrasivo no tribômetro normatizado ASTM G65-16 (2016).



Figura 20 - Corpos de prova sem preparação superficial.
Fonte: Pesquisa direta (2023).

Pode ser observado na figura 20 a superfície dos corpos de prova antes da preparação para o ensaio de desgaste abrasivo.

Conforme a norma ASTM G65-16 (2016), para uma superfície com acabamento retificado, o corpo de prova precisa ter uma rugosidade superficial de $0,8 \mu\text{m}$ ou menos. Como foi pontuado no capítulo 2, o atrito superficial é reduzido para superfícies com baixos valores de rugosidade, por isso este trabalho pretendeu obter o menor valor de rugosidade superficial possível para a realização do ensaio.

Para alcançar os valores mínimos desejados para a rugosidade superficial, os corpos de prova foram submetidos a diversos processos de lixamento e polimento. Assim como o procedimento de preparação para o ensaio de micrografia, os corpos de prova foram lixados utilizando lixas de números 180, 220, 320, 400, 600, 800, 1000 e 1200. Para finalização do acabamento dos corpos de prova, foi realizado polimento em duas etapas, usando aluminas de 1 micron e de 0,05 micron de granulometria. A figura 20 demonstra os corpos de prova após o processo de lixamento e polimento.



Figura 21 - Corpos de prova lixados e polidos.
Fonte: Pesquisa direta (2023).

É possível observar na figura 21 o acabamento final da superfície dos corpos de prova.

Após a finalização do processo de acabamento superficial, foi realizado a medição da rugosidade da superfície dos corpos de prova. Para tal medição foi utilizado o rugosímetro TR200 da marca *Time*. Vide figura 22.



Figura 22 - Medição de superfície com rugosímetro.
Fonte: Pesquisa direta (2023).

Na figura 22, o display do rugosímetro apresentou o perfil de rugosidade do corpo de prova, o qual está bem uniforme sem picos e vales acentuados. O equipamento de medição lê

os valores de rugosidade através de um apalpador que desliza sobre a superfície. O rugosímetro apresentada também em seu display, além dos perfis de rugosidade, valores de rugosidade média, de pico, de pico a vale, entre outros parâmetros.

Foi utilizado o parâmetro de rugosidade média (RA), conforme a norma DIN4760, e para garantia de precisão na medição da rugosidade, as medições foram realizadas em vários pontos dos corpos de prova e foi efetuado a média aritmética dos valores medidos. Para o corpo de prova A foi obtido um valor médio de rugosidade de $0,036 \mu\text{m}$ e para o corpo de prova B $0,040 \mu\text{m}$, tais valores totalmente aceitáveis pela norma ASTM G65-16 para realização do ensaio de desgaste abrasivo para superfícies retificadas.

Validado o pré-requisito da rugosidade, foi iniciado a preparação do ensaio de desgaste abrasivo normatizado ASTM G65-16. A figura 23 demonstra o abrasômetro do laboratório de tribologia do Departamento de Engenharia Mecânica da UFOP utilizado para a realização do ensaio.



Figura 23 - Abrasômetro ASTM G65-16.
Fonte: Pesquisa direta (2022).

Para realização do ensaio no abrasômetro, o primeiro passo foi a limpeza dos corpos de prova, para tal foi utilizado detergente neutro com intuito de remoção de impurezas superficiais. Após a limpeza com um pedaço de algodão, foi realizado o enxágue com água corrente. Foi necessário um segundo enxágue com álcool isopropílico para certificação que todas as

impurezas fossem removidas; por fim, os corpos de prova foram secos com o auxílio de um soprador térmico.

Após a limpeza dos corpos de prova, os mesmos foram pesados em uma balança de precisão de 0,001g no laboratório de tribologia do Departamento de Engenharia Mecânica, vide figura 24.

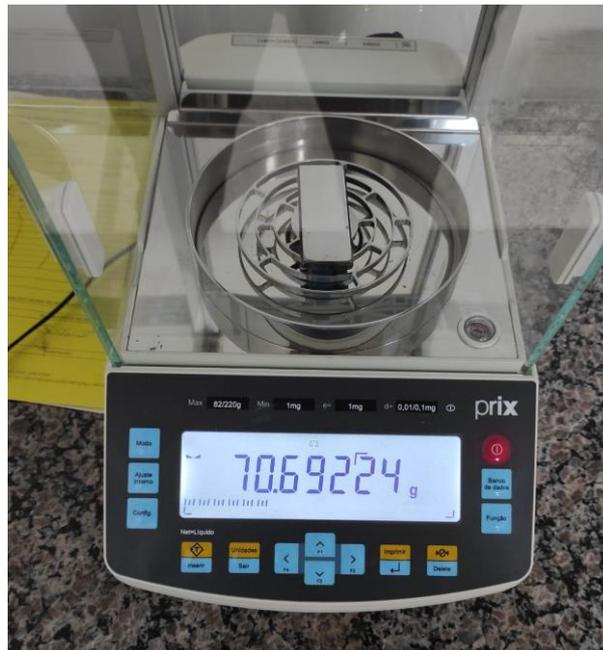


Figura 24 - Corpo de prova B sendo pesado em balança de precisão.
Fonte: Pesquisa direta (2023).

A figura 24 ilustra o processo de pesagem do corpo de prova B anteriormente ao ensaio no abrasômetro ASTM G65-16. Para o corpo de prova A, a massa aferida pela balança foi de 71,04835g e para o corpo de prova B 70,69224g.

Após a aferição de peso das amostras, foi realizado o processo de lubrificação dos corpos de prova. O corpo de prova A foi lubrificado com o condicionador de metais Militec-1® (figura 25) e o corpo de prova B foi lubrificado com a graxa a base de sabão de lítio Unilit Blue (figura 27).



Figura 25 - Condicionador de metais Militec 1®.
Fonte: Pesquisa direta (2023).

A figura 25 ilustra o condicionador de metais utilizado para lubrificar o corpo de prova A.

Um ponto importante a ser destacado é referente ao procedimento de lubrificação utilizando o condicionador de metais, pois, segundo o fabricante, o lubrificante adsorve à superfície do metal a partir de uma temperatura de “ativação” a qual é entre 38°C à 66°C. Então, para a realização da lubrificação do corpo de prova A foi-se utilizado um pincel para distribuição do lubrificante por toda a superfície da peça. Em seguida, a superfície do corpo de prova foi aquecida por um soprador térmico até uma temperatura aproximada de 70°C durante 10 minutos, conforme figura 26.



Figura 26 - a) Corpo de prova A sendo aquecido. b) Temperatura do corpo de prova A após 10 minutos de aquecimento.
Fonte: Pesquisa direta (2023).

Na figura 26 é possível observar o procedimento de aquecimento pós lubrificação do corpo de prova e o controle da temperatura utilizando um pirômetro.

Para a realização da lubrificação do corpo de prova B foi-se utilizado também um pincel para distribuição do lubrificante por toda a superfície da peça, e observado a homogeneidade ao longo de toda a superfície.



Figura 27 - Graxa a base de sabão de lítio Unilit Blue.
Fonte: Pesquisa direta (2023).

Na figura 27 é possível observar a graxa a base de sabão de lítio utilizada para lubrificar o corpo de prova B.

Após os procedimentos de aplicação dos lubrificantes, foi possível observar que o corpo de prova A ficou com um aspecto seco, o qual aparentemente adsorveu parte do lubrificante durante o processo de aquecimento. Já o corpo de prova B teve o aspecto padrão de uma peça lubrificada com graxa, com uma película uniforme de lubrificante. Vide figura 28.

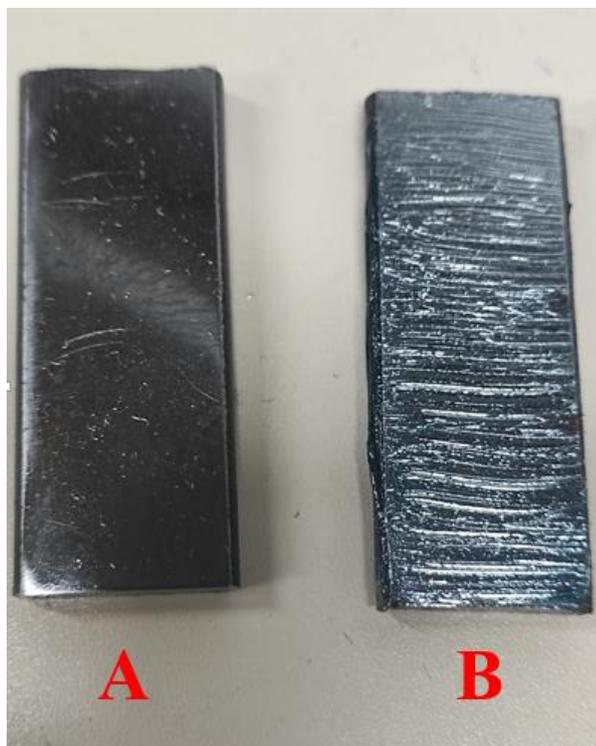


Figura 28 - Corpos de prova lubrificados (em A com condicionador de metais e em B com a graxa a base de sabão de lítio).
Fonte: Pesquisa direta (2023).

Pode-se observar na figura 28 os corpos de prova lubrificados com os dois tipos de lubrificantes propostos para o ensaio experimental.

Com os corpos de prova já lubrificado, foi iniciado o procedimento do ensaio de desgaste abrasivo no equipamento ASTM G65-16. Foi-se adotado o procedimento A (conforme detalhado na tabela 1, do item 2.6 do atual trabalho), o qual o primeiro passo foi posicionar a amostra de forma segura no suporte, então foi adicionado o peso ao braço de alavanca para desenvolver a força adequada (130N) pressionando a amostra contra a roda. Antes do início de rotação da roda de borracha, foi necessário aguardar o fluxo de abrasivo estar uniforme e sem interrupções. O abrasivo selecionado foi a areia normal brasileira (IPT) n. 100, regida pela norma NBR-7214 com tamanho médio das partículas de 150 μ m, que está dentro dos critérios da norma ASTM G65. Com o fluxo de areia constante, a rotação do motor foi iniciada e a alavanca abaixada para que o porta amostra contendo o corpo de prova fosse pressionado contra à roda de borracha, realizando-se a abrasão do corpo de prova. Foram realizadas pausas durante

o ensaio, para que não ocorresse superaquecimento da borracha, tais pausas ocorriam entre três e cinco minutos de tempo de rotação do ensaio, pois a interface de contato se aquecia aproximadamente até 130 °C (figura 29).

Cada corpo de prova foi submetido à 28,6 minutos de abrasão, pois o procedimento escolhido foi de 6000 ciclos em trinta minutos para uma roda que gira a 200 rpm, reajustando o cálculo para os parâmetros com um motor de 210 rpm, o tempo para 6000 ciclos foi reduzido conforme o padrão A da norma ASTM G65-16.



Figura 29 - Monitoramento da temperatura durante o ensaio de desgaste abrasivo.
Fonte: Pesquisa direta (2023).

A figura 29 descreve o ensaio em andamento, a qual é possível ver o fluxo de areia sendo despejado na interface das superfícies da roda de borracha e do corpo de prova ensaiado. Também é possível observar a roda de borracha em rotação e o porta amostras pressionando o corpo de prova contra a mesma, além da temperatura mensurada na interface de contato.

Após a realização do ensaio de desgaste abrasivo, os corpos de prova foram lavados com detergente neutro enxaguados por água, realizado um segundo enxague com álcool isopropílico e por fim foram secos com o auxílio do soprador térmico. Os corpos de prova foram colocados lado a lado para uma análise comparativa, vide figura 30.

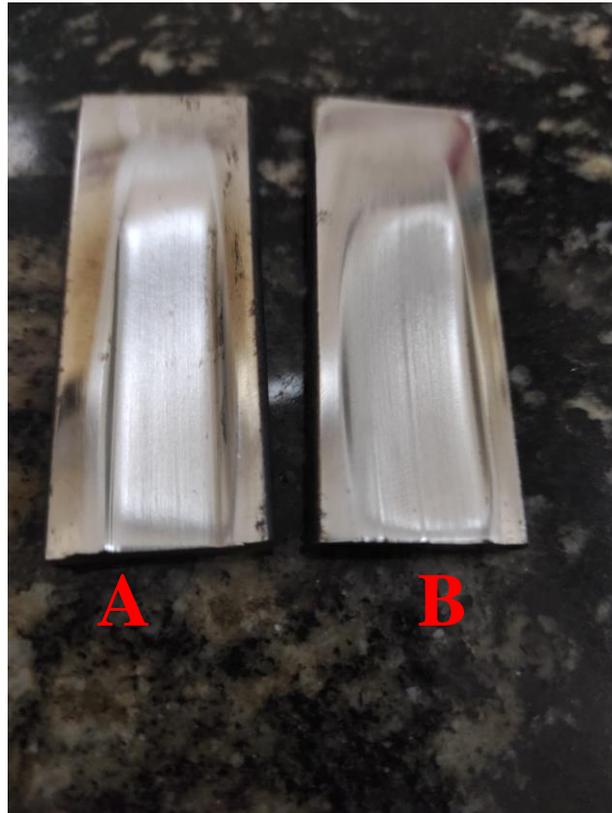


Figura 30 - Corpos de prova após o ensaio.
Fonte: Pesquisa direta (2023).

Pode-se observar na figura 30, como ficou a superfície dos corpos após o ensaio de desgaste abrasivo em roda de borracha ASTM G65-16. Pode-se observar que o corpo de prova A teve o desgaste de sua superfície mais uniforme enquanto no corpo de prova B o desgaste foi mais distribuído em sua área de superfície de contato.

4.2 Cálculo da taxa de desgaste e comparação dos resultados

Dividindo a equação (6) de volume perdido ajustado da norma ASTM G65-16, pela distância de deslizamento do procedimento “A” da tabela 1, encontra-se a taxa de desgaste (Q) da equação Archard (1), e então é calculado o coeficiente de desgaste admissional (K):

$$Q = \frac{\text{Volume perdido ajustado}(\text{mm}^3)}{\text{Distância de deslizamento (m)}}$$

$$Q = \frac{K * F}{H} \quad \therefore \text{ Isolando o K, têm-se :}$$

$$K = Q * \frac{H}{F}$$

Fazendo o cálculo para as duas amostras tem-se:

$$Q_A = 0,208540 \frac{mm^3}{m}$$

$$Q_B = 0,198728 \frac{mm^3}{m}$$

$$K_A = 0,2130$$

$$K_B = 0,2030$$

As tabelas 6 e 7 demonstram os valores obtidos para cada amostra, para os valores do coeficiente de desgaste foi utilizado a equação de Archard (1), e para o volume retirado, em mm^3 , foram utilizadas as equações (5) e (6) da norma ASTM G65-16.

Tabela 6 - Dados do corpo de prova A.

CORPO DE PROVA A (MILITEC-1)	
Densidade [g/cm^3]	7,87
Força [N]	130
Dureza [HV5]	132,8
Diâmetro Inicial [mm]	328,2
Diâmetro Final [mm]	325,9
Distância de deslizamento	4309
Massa Inicial [g]	71,04835
Massa Final [g]	64,02591
Massa perdida [g]	7,02244
Volume perdido [mm^3]	892,3050
Volume perdido ajustado [mm^3]	898,6023
Taxa de desgaste [mm^3/m]	0,2085
Coeficiente de desgaste K	0,2130

Fonte: Pesquisa direta (2023).

A tabela 6 apresenta os valores obtidos da taxa de desgaste (Q) e o coeficiente de desgaste (K) para o corpo de prova A durante o ensaio, bem como as grandezas mensuradas e calculadas para alcance dos objetivos propostos por este trabalho.

Tabela 7 - Dados do corpo de prova B.

CORPO DE PROVA B (GRAXA DE SABÃO DE LÍTIO)	
Densidade [g/cm ³]	7,87
Força [N]	130
Dureza [HV5]	132,8
Diâmetro Inicial [mm]	319,2
Diâmetro Final [mm]	317,1
Distância de deslizamento	4309
Massa Inicial [g]	70,69224
Massa Final [g]	63,99734
Massa perdida [g]	6,6949
Volume perdido [mm ³]	850,6861
Volume perdido ajustado [mm ³]	856,3198
Taxa de desgaste [mm ³ /m]	0,1987
Coefficiente de desgaste K	0,2030

Fonte: Pesquisa direta (2023).

A tabela 7 apresenta os valores obtidos da taxa de desgaste (Q) e o coeficiente de desgaste (K) para o corpo de prova B durante o ensaio, bem como as grandezas mensuradas e calculadas para alcance dos objetivos propostos por este trabalho.

Apesar dos corpos de prova terem sido polidos e lubrificados, o desgaste foi acentuado quando se comparado com a literatura apresentada no capítulo 2.

Após a realização dos cálculos de taxa de desgaste e coeficiente de desgaste K, foi possível observar que o corpo de prova B possuiu resistência ao desgaste 4,93% maior que o corpo de prova A.

A figura 31 retrata o resultado da análise comparativa realizada entre os corpos de prova lubrificados pelo condicionador de metais e pela graxa à base de sabão de lítio.

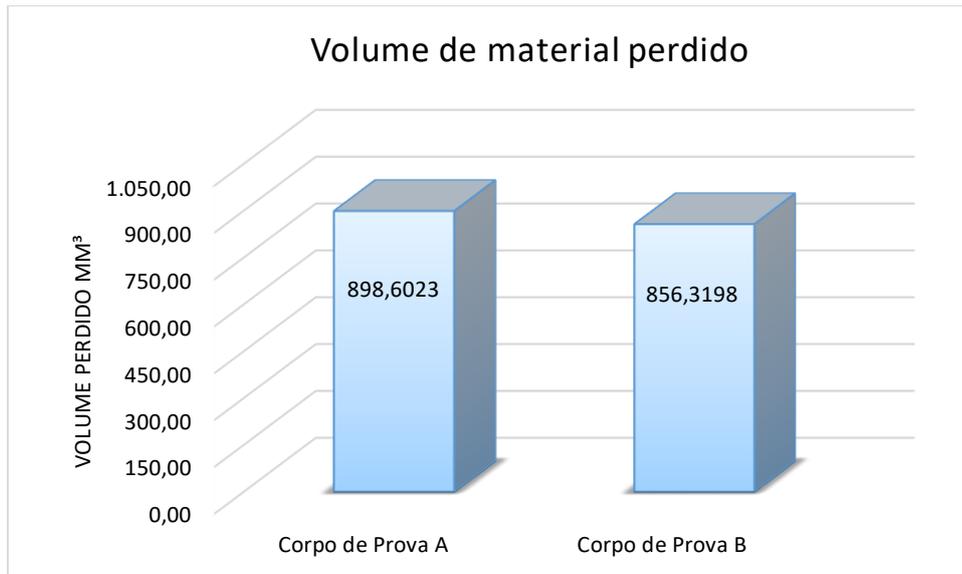


Figura 31 - Gráfico comparativo do volume perdido pelas amostras.
Fonte: Pesquisa direta (2023).

Pode-se observar na figura 31 que o corpo de prova B (lubrificado por graxa) obteve volume perdido menor que o corpo de prova A (lubrificado pelo condicionador de metais). Durante os ensaios foi observado uma semelhança de temperatura entre os corpos A e B, mesmo utilizando tipos de lubrificantes bem distintos, ainda que a lubrificação possa ser caracterizada como lubrificação limítrofe, a lubrificação por graxa nesse ensaio promoveu uma camada de lubrificante maior e permitiu uma diferença de 4,71% a menos de volume perdido em relação ao corpo de prova lubrificado pelo condicionador de metais.

Foi possível também realizar a comparação da cicatriz deixada pelo abrasivo nos corpos de prova, vide figura 32.

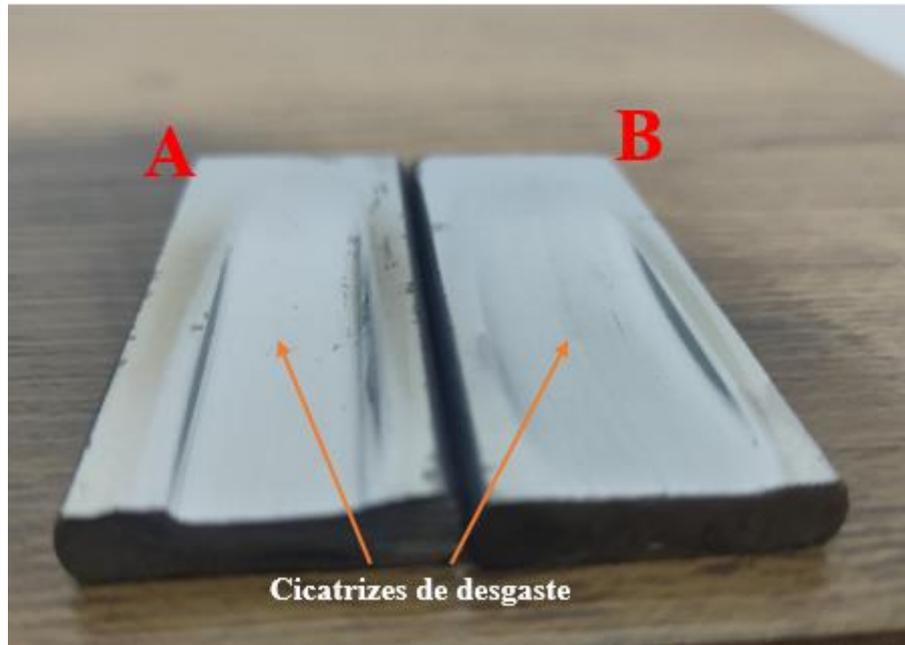


Figura 32 - Cicatriz de desgaste após o ensaio.
Fonte: Pesquisa direta (2023).

É possível observar na figura 32 que o corpo de prova A teve a profundidade da cicatriz maior que o corpo de prova B, entretanto o corpo B teve uma área maior desgastada, tal acontecimento pode ter ocorrido devido a um desbalanceamento da roda de borracha, visto que os corpos de prova foram fixos de tal maneira que não faziam nenhum tipo de movimento, seja lateral ou vertical. Apesar das cicatrizes deixadas pelo ensaio terem padrões diferentes, houve apenas uma diferença de aproximadamente 5% entre os coeficientes de desgaste K e o volume perdido pelos corpos de prova.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 Conclusões

Neste capítulo é realizada a apresentação das conclusões referentes à pesquisa e as recomendações para trabalhos futuros relacionados ao tema estudado.

A questão problema apresentada pelo trabalho foi: qual a resistência ao desgaste abrasivo de superfícies de aço 1020 lubrificadas com condicionador de metais em comparação com a mesma superfície lubrificada com graxa de lítio?

Então, o propósito do trabalho foi analisar comparativamente a taxa de desgaste em superfícies de aço SAE 1020 lubrificadas com condicionador de metais em relação à lubrificação com graxa de lítio, estudar os fenômenos tribológicos que ocorrem nos processos de desgaste, lubrificação e um novo tipo de lubrificante, onde a partir de ensaios de desgaste abrasivo simulados pelo equipamento normatizado pela ASTM G65-16 (2016), foi possível determinar o volume desgastado desse material pelo fenômeno de abrasão a 3 corpos e calcular o coeficiente e taxa de desgaste abrasivo para os corpos de prova estudados.

Para as condições de trabalho realizadas, foi possível concluir que o ensaio realizado explorou os pontos focais da atuação do condicionador de metais, uma vez que seu fabricante informa que o mesmo atua reduzindo o atrito e promovendo maior resistência, e a partir do ensaio de desgaste abrasivo foi provado que apenas o uso do condicionador de metais como lubrificante principal não conseguiu reduzir o desgaste abrasivo à três corpos quando se comparado à graxa de sabão de lítio, pois houve uma diferença de aproximadamente 5% a mais de perda de volume para o corpo de prova lubrificado com o condicionador de metais.

Portanto, pode-se dizer que apesar da evolução de novos tipos de lubrificantes é necessário observar cada tipo de tribossistema e dos lubrificante para seleção da melhor maneira de se controlar o atrito e permitir então o melhor desempenho dos sistemas.

Enfim, conclui-se que o presente trabalho alcançou todos os seus objetivos e respondeu de forma satisfatória a pergunta problema.

5.2 Recomendações

No presente tópico estão listadas algumas recomendações para trabalhos futuros acerca do tema do uso do condicionador de metais para redução de desgaste abrasivo a 3 corpos.

- Utilizar o condicionador de metais diluído em outro lubrificante conforme recomendação do fabricante;
- Utilizar de novos tipos de materiais com durezas e diferentes composições micro estruturais e químicas para se obter novos parâmetros de comparação.

6 REFERÊNCIAS

AHMED, N. S.; NASSAR, A. M. Lubrication and Lubricants. In: GEGNER, J. **Tribology - Fundamentals and Advancements**. 1ª. ed. [S.l.]: Intechopen, v. I, 2013. Cap. 2, p. 55-75.

ALMQVIST, A. Doctoral Thesis. **On the Effects of Surface Roughness in Lubrication**, Luleå, 2006.

ARCHARD, J. F. Journal of Applied Physics 24. **Contact and Rubbing of Flat Surfaces**, Berkshire, Agosto 1953. 981-988.

ASSIS, M. C. Metodologia do Trabalho Científico, 2021. Disponível em: <<https://hugoribeiro.com.br/biblioteca-digital/Assis-Metodologia.pdf>>. Acesso em: 21 nov. 2022.

ASTM. Annual Book of ASTM Standards. In: INTERNATIONAL, A. **ASTM G65-16 - Standard test method for measuring abrasion using the dry sand/rubber wheel apparatus**. Philadelphia, PA: [s.n.], v. 03.02, 2016. p. 247-259.

ASTM: AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Terminology Relating to Wear, ASTM G40-15**. [S.l.]. 2015.

BABIC, M. Nature of the Tribology - Maintenance Relation. **Tribology in industry, Volume 23**, Kragujevac, 2001.

BHUSHAN, B. **Introduction to Tribology**. 2ª. ed. Nova York: John Wiley & Sons, Ltd, v. I, 2013.

BHUSHAN, B.; NOSONOVSKY, M. Acta Materialia 52. **Comprehensive model for scale effects in friction due to adhesion and two- and three-body deformation (plowing)**, Columbus, Janeiro (2004). 2461–2474.

BLAU, P. J. Tribology International 34. **The significance and use of the friction coefficient**, Oak Ridge, (2001). 585–591.

BLAU, P. J. **Friction, Lubrication, and Wear Technology**. ASM Handbook. ed. Oak Ridge: ASM INTERNATIONAL, v. 18, 1992.

BLAU, P. J. **Friction science and technology: from concepts to applications**. 2^a. ed. Boca Raton: CRC Press, v. I, 2009.

BLAU, P. J. **Tribosystem Analysis - A practical approach to the diagnosis of wear problems**. 1^a. ed. Boca Raton: CRC Press, v. I, 2016.

BOEHRINGER, R. H. Grease. In: BLAU, P. J. **Friction, Lubrication, and Wear Technology**. ASM Handbook. ed. Oak Ridge: ASM INTERNATIONAL, v. 18, 1992. p. 219-239.

BOGDANOVICH, P. N.; TKACHUK, D. V. Journal of Friction and Wear, Vol. 30. **Thermal and Thermomechanical Phenomena in Sliding Contact**, Gomel, 2009. 153–163.

BONER, C. J. National Lubricating Grease Institute. "**Manufacture and Applications of Lubricating Grease**" , 1955.

BUDINSKI, K. G. **Surface Engineering for Wear Resistance**. 1^a. ed. Michigan: Prentice Hall , v. I, 1988.

BURSTEIN, L. Lubrication and roughness. In: SAHOO, P. **Tribology for Engineers**. 1^a. ed. Cambridge: Woodhead Publishing, v. I, 2011. Cap. 3, p. 65-120.

BUSCH, C. Solid Lubrication. In: MANG, T.; DRESEL, W. **Lubricants and Lubrication**. 2^a. ed. Weinheim: WILEY-VCH GmbH, v. I, 2007. Cap. 17, p. 694-714.

CALABOKIS, O. P. et al. MDPI - Lubricants 2022, 10, 143. **Effect of an Aftermarket Additive in Powertrain Wear and Fuel Consumption of Small-Capacity Motorcycles: A Lab and Field Study**, 6 July 2022.

CARPINETTI, L. C. R. et al. **Rugosidade Superficial - Conceitos e princípios de medição**. 1^a. ed. São Carlos: EESC-USP, v. I, 1996.

CORSI, T.; LAGE, T. F.; SANTOS, D. G. ESTUDO DE DESGASTES COM APLICAÇÃO DE CONDICIONADORES DE METAIS. **Anais do 1 ° Simpósio de TCC, das faculdades FINOM e Tecsoma**, 2019. 1212-1227.

CZICHOS, H. **Tribology - A systems approach to the science and technology of friction, lubrication and wear**. 1^a. ed. Amsterdam: ELSEVIER SCIENTIFIC PUBLISHING COMPANY, v. I, 1978.

CZICHOS, H. Measurement, Testing and Sensor Technology. **Introduction to Tribology**, 2018.

CZICHOS, H. Overview of Tribology. **A survey of the fundamentals of tribology and the application of measurement and testing to the determination and presentation of friction and wear data.**, Berlin, 2020. 1-28.

DE OLIVEIRA, F. S. et al. Encontro Nacional de Engenharia de Produção. **Avaliação de Desempenho Econômico da Aplicação de um Condicionador Metálico em Machos de Corte no Processo de Rosqueamento Interno**, Curitiba, 2014. 35-83.

DRESEL, W.; HECKLER, R.-P. Lubricating Greases. In: DRESEL, W.; MANG, T. **Lubricants and Lubrication**. 2ª. ed. Weinheim: WILEY-VCH GmbH, v. I, 2007. Cap. 16, p. 781-842.

EYRE, T. S. The mechanisms of wear. **Tribology International**, Uxbridge, UK., Abril 1978. 6.

FEIN, R. S. Liquid Lubricants. In: BLAU, P. J. **Friction, Lubrication, and Wear Technology**. ASM Handbook. ed. Oak Ridge: ASM INTERNATIONAL, v. 18, 1992. p. 125-142.

GAHR, K.-H. Z. **Tribology Series - Microstructure and Wear of materials**. 1ª. ed. Amsterdam: Elsevier Science Publishers B. V., v. X, 1987.

GERMANY, D. J. **A mineração no Brasil**. Secretaria Técnica do Fundo Setorial Mineral. Rio de Janeiro, p. 60. 2002.

GIL, A. C. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. 4ª. ed. São Paulo: Atlas, v. I, 2002.

HUTCHINGS, I. M. **Tribology - Friction and Wear of Engineering Materials**. 1ª. ed. Bristol: Arnold, v. I, 1992.

IBRAM - © 2022. IBRAM - Mineração em Números. **IBRAM - Mineração do Brasil**, 2022. Disponível em: <<https://ibram.org.br/mineracao-em-numeros/>>. Acesso em: 16 ago. 2022.

JIMÉNEZ, A.-E.; BERMÚDEZ, M.-D. **Tribology for Engineers**. 1ª. ed. Cambridge: Woodhead Publishing, v. I, 2011.

JOST, H. P. Tribology - Origin and Future. **WEAR**, 136, London, UK., 1990. 17.

LACERDA, I. O QUE A MINERAÇÃO REPRESENTA PARA A ECONOMIA BRASILEIRA. **AMIG - Associação dos municípios mineradores de Minas Gerais e do Brasil**, 2020. Disponível em: <<https://www.amig.org.br/noticias/o-que-a-mineracao-representa-para-a-economia-brasileira#:~:text=A%20ind%C3%BAstria%20mineral%20contribui%20de,US%24%207%2C4%20bilh%C3%B5es>>. Acesso em: 16 ago. 2022.

LANSDOWN, A. R. Mechanical Engineering Publications. "**Lubrication and Lubricant Selection**", London, 1996. 139–141.

MARU, M. M. Tese de Doutorado. **Estudo do desgaste e atrito de um par metálico sob deslizamento lubrificado**, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2003.

MILITEC. Militec-1 Brasil. **Militec-1 Brasil**, 2023. Disponível em: <<https://militecbrasil.com.br/militec-1/>>. Acesso em: 15 jan. 2023.

MYSHKIN, N. K.; GRIGORIEV, A. Y. Tribology in Industry. **Roughness and Texture Concepts in Tribology**, 2013. 97-103.

PURQUÉRIO, B. D. M. **Tribologia, Lubrificantes e Regimes de Lubrificação**. 2ª. ed. São Carlos: Universidade de São Paulo - Escola de Engenharia de São Carlos, v. I, 1998.

RAHIMDEL, M. J. et al. MAINTENANCE PLAN FOR A FLEET OF ROTARY DRILL RIGS. **Arch. Min. Sci.**, Vol. 59 (2014), No 2, p. 441–453, Tabriz, Iran, 28 out. 2013. 13.

RAHIMDEL, M. J. et al. Reliability-based maintenance scheduling of hydraulic system of rotary drilling machines. **International Journal of Mining Science and Technology**, Xuzhou, 31 ago. 2013. 5.

RIZVI, S. Q. A. Lubricant Additives and Their Functions. In: BLAU, P. J. **Friction, Lubrication, and Wear Technology**. ASM Handbook. ed. Oak Ridge: ASM INTERNATIONAL, v. 18, 1992. p. 163-218.

ROSSI, M. E.; DEUTSCH, C. V. **Mineral Resource Estimation**. 1ª. ed. Dordrecht: Springer Science, v. I, 2014.

SAFRONCHUK, K. A.; KNYAZKINA, V. I.; IVANOV, S. L. Mobile lubrication and filling units to reduce mining machines and equipment downtime when providing maintenance. **IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 560 (2019)**, Saint Petersburg, 2019. 6.

SAHOO, P. et al. **Tribology for Engineers**. 1^a. ed. Cambridge: Woodhead Publishing, v. I, 2011.

SHELL LUBRICANTS. HOW TOTAL COST OF OWNERSHIP PROGRAMS CAN HELP IMPROVE LUBRICATION AND REDUCE MAINTENANCE COSTS. **Edelman Intelligence**, p. 28, 2018.

SILVA, E. N. D. Dissertação de Mestrado. **Viabilidade econômica em processos de rosqueamento utilizando machos de roscar com condicionador metálico**, Universidade Nove de Julho, São Paulo, 2014.

SLINEY, H. E. Solid Lubricants. In: BLAU, P. J. **Friction, Lubrication, and Wear Technology**. ASM Handbook. ed. Oak Ridge: ASM INTERNATIONAL, v. 18, 1992.

STACHOWIAK, G. W.; BATCHELOR, A. W. **Engineering Tribology**. 4^a. ed. Waltham: Butterworth-Heinemann, v. I, 2014.

STRAFFELINI, G. Wear Mechanisms. In: STRAFFELINI, G. **Friction and Wear**. 1^a. ed. Trento: Springer International Publishing Switzerland, v. I, 2015. Cap. 4, p. 88-113.

TORBACKE, M.; RUDOLPHI, Å. K.; KASSFELDT, E. **LUBRICANTS: INTRODUCTION TO PROPERTIES AND PERFORMANCE**. 1^a. ed. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd, v. I, 2014.

VERGARA, S. C. **Projetos e Relatórios de Pesquisa em Administração**. 12^a. ed. São Paulo: Atlas, 2010.

Anexo