



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – UFOP
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA



Wictor Phillipe Ribeiro Alves

**Estudo sobre o desgaste abrasivo causado por lubrificantes
contaminados com minério de ferro em aço 1020**

OURO PRETO - MG
2021

Wictor Phillipe Ribeiro Alves
Wictor.ribeiro2@gmail.com

**Estudo sobre o desgaste abrasivo causado por lubrificantes
contaminados com minério de ferro em aço 1020**

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.

Professor orientador: Zirlene Alves da Silva Santos, PhD.

OURO PRETO – MG
2021

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

A474e Alves, Wictor Phillipe Ribeiro .

Estudo sobre o desgaste abrasivo causado por lubrificantes contaminados com minério de ferro em aço 1020. [manuscrito] / Wictor Phillipe Ribeiro Alves. - 2021.

46 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. Tribologia. 2. Desgaste. 3. Abrasômetro. 4. Lubrificação - Contaminação. I. Santos, Zirlene Alves da Silva. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 621



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECANICA



FOLHA DE APROVAÇÃO

Wictor Phillipe Ribeiro Alves

Estudo sobre o desgaste abrasivo causado por lubrificantes contaminados com minério de ferro em aço 1020

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 08 de Dezembro de 2021

Membros da banca

PhD. Zirlene Alves da Silva Santos, Orientadora, Universidade Federal de Ouro Preto
DSc. Diogo Antônio de Sousa, Universidade Federal de Ouro Preto
Dsc. Vinicius Carvalho Teles, 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 09/12/2021



Documento assinado eletronicamente por **Zirlene Alves da Silva Santos, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 10/12/2021, às 13:01, 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 **0256691** e o código CRC **07B4BDE1**.

Agradeço a todos os que estiveram presentes e me apoiaram nesse meu desafio em cursar engenharia, sou muito grato por mais essa etapa está sendo concluindo.

AGRADECIMENTO

Agradeço primeiramente ao meus pais e familiares, por todo amor que me ensinaram a ter. Pelo apoio e incentivo na minha vida acadêmica pois sem vocês eu não seria nada.

Em especial a minha orientadora Zirlene Alves Da Silva Santos, por todo o incentivo e conhecimento passados, apoio nas dificuldades e disponibilizar de seu tempo e paciência em me orientar.

Ao técnico Marconi Cosme Silva do departamento de engenharia mecânica (DEMEC), pela disposição e auxílios prestados durante os ensaios.

Agradeço a VALE, FAPEMIG e FAPESPA pela parceria com a UFOP e por disponibilizar os equipamentos utilizados em meu trabalho.

A gloriosa Escola de Minas e a todos os professores da Universidade Federal de Ouro Preto que fizeram sua parte na minha formação com Engenheiro Mecânico, vocês foram essenciais nessa caminhada.

Aos meus companheiros de curso, pelas grandes amizades e por vários momentos que serão inesquecíveis.

E finalmente a minha segunda casa República Taberna, a todos os moradores e ex-alunos, vocês estiveram presentes nos melhores momentos da minha vida, amo todos vocês.

*“Lembre-se que as pessoas podem tirar tudo de você,
menos o seu conhecimento”.*

Albert Einstein

RESUMO

Esse trabalho teve a finalidade de estudar a taxa de desgaste sofrida pelo aço SAE 1020 com lubrificação contaminada por minério de ferro. O desgaste abrasivo é responsável pelo excesso de paradas não programadas em equipamentos que trabalham com materiais abrasivos, por quebra ou perda de funcionalidade dos componentes que estão em contato e movimento relativo. Para o estudo dessa taxa de desgaste, foi utilizado o Abrasômetro que segue os padrões da norma ASTM G65-16, que se encontra na Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP. O Abrasômetro ASTM G65-16 realiza teste com parâmetros padronizados simulando o processo de desgaste abrasivo. O procedimento de ensaio contempla três etapas começando pela preparação das amostras, preparação do abrasivo, realização do ensaio e o cálculo do volume desgastado. Com as análises dos resultados e fundamentação teórica foi constatado que o desgaste predominante em processos industriais é o abrasivo a 3 corpos, ocasionando um desgaste muito severo. Foram realizados dois testes, um com corpo de prova lubrificado com graxa a base de sabão de lítio, e o outro foi realizado a seco para análise comparativa. Os resultados alcançados demonstram que a contaminação da lubrificação é um problema que afeta os processos industriais através do aumento das paradas não programadas e redução do ciclo de vida dos componentes e equipamentos. Embora o lubrificante reduza a taxa de desgaste, por suas propriedades, ainda assim ocorre o contato de partículas abrasivas e como consequência o desgaste abrasivo a 3 corpos.

Palavras-chave: Tribologia. Desgaste. Abrasômetro. Contaminação da lubrificação.

ABSTRACT

This work aimed to study the wear rate suffered by SAE 1020 steel with lubrication contaminated by iron ore. Abrasive wear is responsible for the excess of unscheduled stops in equipment that work with abrasive materials, for breakage or loss of functionality of the components that are in contact and relative movement. To study this wear rate, an Abrasometer was used, which follows the standards of the ASTM G65-16 standard, which is found at the Federal University of Ouro Preto – UFOP. The ASTM G65-16 Abrasometer performs test with standardized parameters simulating the abrasive wear process. The test procedure comprises three steps starting with sample preparation, abrasive preparation, test performance and the calculation of the worn volume. With the analysis of the results and theoretical foundation, it was found that the predominant wear in industrial processes is the 3-body abrasive, causing a very severe wear. Two tests were carried out, one with a specimen lubricated with lithium soap-based grease, and the other was carried out dry for comparative analysis. The results achieved demonstrate that lubrication contamination is a problem that affects industrial processes through the increase in unscheduled shutdowns and reduction in the life cycle of components and equipment. Although the lubricant reduces the wear rate, due to its properties, there is still contact with abrasive particles and, as a consequence, abrasive wear to 3 bodies.

Key-words: Tribology, Wear, Abrasometer. Lubrification contamination.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Gráfico da taxa de desgaste dos quatro tipos de desgaste que afetam as máquinas..	2
Figura 2: Visão geral dos parâmetros de um tribossistema	6
Figura 3: Transformações de energia em um sistema tribológico.....	7
Figura 4: Representação básica dos mecanismos de atrito.....	9
Figura 5: Representação dos mecanismos de desgaste.....	11
Figura 6: Contato de transferência de partículas no desgaste por adesão	12
Figura 7: Esquema de (a) uma superfície dura e áspera e uma superfície montada com deslizamento de grãos abrasivos em uma superfície mais macia, e (b) grãos abrasivos livres presos entre as superfícies com pelo menos uma das superfícies mais macias que os grãos...	13
Figura 8: Esquema ilustrativo do mecanismo de desgaste abrasivo por sulcamento.	14
Figura 9: Esquema ilustrativo do mecanismo de desgaste abrasivo por microcorte.	14
Figura 10: Esquema ilustrativo do mecanismo de desgaste abrasivo por microtrincamento ...	15
Figura 11: Abrasômetro do tipo roda de borracha.....	16
Figura 12: Fluxograma do procedimento experimental	26
Figura 13: Abrasômetro ASTM G65.....	29
Figura 14: Corpos de prova aço SAE 1020	30
Figura 15: Lixadeira metalográfica	31
Figura 16: Microdurômetro Vickers.....	32
Figura 17: Graxa a base de sabão de lítio	33
Figura 18: Areia normal brasileira (IPT) n. 100.....	34
Figura 19: Gráfico comparativo entre o volume perdido pelas duas amostras	36
Figura 20: Cicatriz de desgaste deixado pela roda de borracha após a realização do ensaio abrasivo.....	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Procedimentos de ensaio ASTM G65-16	17
Tabela 2: Principais aditivos utilizados em lubrificantes	19
Tabela 3: Exemplo do plano de manutenção.....	23
Tabela 4: Tipos de pesquisa.....	24
Tabela 5: Tipos de pesquisa.....	25
Tabela 6: Instrumentos e materiais utilizados	26
Tabela 7: Variáveis e indicadores.....	27
Tabela 8: Dados amostrais amostra 1	35
Tabela 9: Dados amostrais amostra 2	36

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Formulação do Problema.....	1
1.2	Justificativa.....	3
1.3	Objetivos.....	3
1.3.1	Geral	3
1.3.2	Específicos.....	3
1.4	Estrutura do Trabalho	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1	TRIBOLOGIA.....	5
2.2	FENOMENOS TRIBOLOGICOS	7
2.3	ATRITO.....	8
2.4	PROCESSOS DE DESGASTE.....	9
2.4.1	DESGASTE ADESIVO	11
2.4.2	DESGASTE ABRASIVO	13
2.5	ABRASÔMETRO RODA DE BORRACHA	16
2.6	LUBRIFICAÇÃO.....	18
2.6.1	CONTAMINAÇÃO DE LUBRIFICANTES	20
2.7	GESTÃO DA LUBRIFICAÇÃO	22
3	METODOLOGIA.....	24
3.1	TIPO DE PESQUISA.....	24
3.2	MATERIAIS E MÉTODOS.....	25
3.3	VÁRIAVEIS E INDICADORES	27
3.4	INSTRUMENTAÇÃO E COLETA DE DADOS.....	27
3.5	TABULAÇÃO E ANÁLISE DE DADOS	28
3.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	28
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	29
4.1	PREPARAÇÃO DOS PARAMETROS DO ENSAIO E DAS AMOSTRAS SEGUNDO A NORMA ASTM G65-16.....	30
4.2	CÁLCULO DA TAXA DE DESGASTE E COMPARAÇÃO.....	35
5	CONCLUSÃO.....	39

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	41
ANEXO.....	44

1 INTRODUÇÃO

1.1 Formulação do Problema

A indústria minero-metalúrgica tem grande importância no mercado brasileiro nas áreas de exploração e processamento de materiais para melhorar nosso cotidiano.

A atual velocidade do desenvolvimento e do avanço de novas tecnologias tem o potencial de promover mudanças em toda a indústria, inclusive nos setores de mineração e metalurgia, considerados tradicionais. Esses setores encontram-se diante de pressões do mercado, pressões ambientais e desafios relacionados à incorporação de conhecimento e tecnologia.

Conforme Ferrante (2014) um dos principais pontos de preocupação das indústrias minero-metalúrgicas é a eficiência operacional. Para tanto, a melhoria contínua da manutenção dos equipamentos garante a disponibilidade física, que é obtida por meio de aprimoramentos nos sistemas de gestão da manutenção.

De acordo com Suzuki (2013), o desgaste é um dos principais causadores das paradas não programadas nas indústrias minero-metalúrgicas, gerando diversas perdas no setor produtivo elevando os custos tanto de manutenção quanto do produto final. Um dos principais problemas a cerca disto é o tipo de matéria-prima que o setor trabalha, o meio de extração em que ela está inserida é muito nocivo aos equipamentos. É necessário dar foco aos sistemas tribológicos envolvidos; pois fenômenos como umidade, partículas em suspensão e alguns contaminantes afetam o desempenho de equipamentos e componentes.

Interações superficiais podem demonstrar o desempenho de grande parte dos conjuntos mecânicos, sendo que uma grande parte desses operam com lubrificação. Nesse caso, a função essencial do lubrificante é a diminuição do atrito dos elementos deslizantes. A presença de lubrificantes na interface de contato em camadas com espessura até mesmo de ordem molecular é capaz de alterar as respostas tribológicas do sistema (PERSSON,1998).

Segundo Bayer *apud* Ray Garvey (2020), um programa de lubrificação é um aspecto crítico para a saúde das máquinas. Ninguém questiona a relação direta entre boas práticas de lubrificação e a uma longa vida útil dos equipamentos. A lubrificação proporciona baixo atrito e reduz as taxas de desgaste nos componentes aumentando a vida útil das máquinas conforme a figura 1.

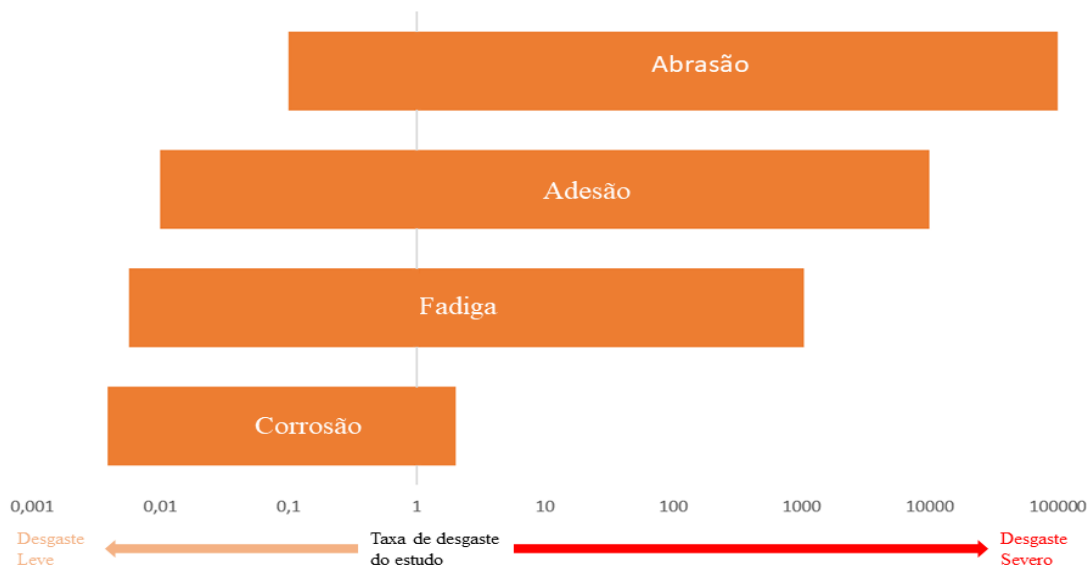


Figura 1: Gráfico da taxa de desgaste dos quatro tipos de desgaste que afetam as máquinas
Fonte: Adaptado de Bayer (2002)

Como visto na figura 1, a “taxa de desgaste do estudo” tem o valor de 1 para as condições que alcançaram as projeções da vida útil do equipamento dado pelo fabricante. O desgaste leve é geralmente inevitável. Não é um problema, mas sim uma condição a ser esperada. A maioria das máquinas tem uma vida finita e desgaste em algum ritmo. O desgaste leve normalmente significa que partículas muito pequenas, menos de cinco microns, estão sendo gastas. Estas partículas são principalmente formadas da camada de óxido que naturalmente se forma em superfícies metálicas (RAY GARVEY, 2020).

É necessário realizar uma análise de óleo principalmente para identificar a presença de contaminantes, e possíveis falhas nos equipamentos. O lubrificante tem dois tipos básicos de falhas, sendo a contaminação por desgaste do equipamento ou por agentes externos. Um reagente muito comum é a água, também pela perda de suas propriedades. Com o tempo o mesmo perde propriedades e deixa de desempenhar suas funções corretamente.

Os contaminantes na maioria das hipóteses irão penetrar no fluido, por melhor que seja o envasamento do lubrificante. As vedações que estão atuando e o processo de manutenção não irão conseguir evitar que o mesmo seja contaminado. Esses contaminantes podem ser classificados como “níveis aceitáveis ou não aceitáveis”. Os principais elementos contaminantes são: Sódio, Potássio e Silício. Como elemento secundário, teremos o Alumínio, que são encontrados em alguns solos (CARVALHO, 2015).

Com base no contexto apresentado e sabendo as maiores causas das paradas não programadas dos equipamentos e toda a produtividade industrial, o problema a ser estudado é:

Qual taxa de desgaste é aferida a partir da interface e movimento relativo da superfície do aço 1020 com lubrificante contaminado por minério de ferro?

1.2 Justificativa

Segundo Gregolin (1990), o desgaste por abrasão influi nos custos diretos de produção devido as necessidades de reposição ou recuperação de peças desgastadas, e também nos custos indiretos de produção pela necessidade de superdimensionamento de componentes e pelas limitações na produção devido a equipamentos deteriorados.

Com isso, o estudo é importante para todo o setor produtivo da indústria, na diminuição das paradas de equipamentos, na melhoria da vida útil das peças e melhorando a gestão da qualidade da manutenção na indústria de extração e fabricação de novas matérias para o mercado.

Essa pesquisa também tem o intuito de contribuir com informações para futuros estudos sobre o tema. A partir deste trabalho será possível analisar como a contaminação dos lubrificantes em equipamentos de mineração favorece as paradas não programadas pela perda de funcionalidade dos componentes devido ao desgaste.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Avaliar a taxa de desgaste abrasivo a partir da interface e movimento relativo do aço 1020 com lubrificante contaminado com minério de ferro.

1.3.2 Específicos

- Desenvolver fundamentação teórica sobre: Tribologia, Sistema tribológico, Fenômenos tribológicos e gestão da lubrificação;
- Identificar e caracterizar o corpo de prova de aço 1020;
- Realizar o corte e o tratamento superficial do corpo de prova;
- Caracterizar o tipo de lubrificante que será utilizado no ensaio;
- Caracterizar o abrasivo para inserir no ensaio;
- Realizar a lubrificação do corpo de prova antes do início do ensaio;

- Seguir as etapas da norma ASTM G65-16 para ensaios de desgaste abrasivo;
- Fazer o cálculo do volume arrancado, conforme a norma ASTM G65-16 e cálculo da taxa de desgaste;
- Demonstrar os resultados utilizando Microsoft Excel.

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.

O segundo capítulo descreve a importância dos estudos tribológicos, como começou e suas definições, fazer uma fundamentação sobre gestão da lubrificação e seus principais efeitos sobre a falha de equipamentos de lubrificação por desgaste.

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

O quarto capítulo mostra os resultados encontrados e as ferramentas utilizadas para calcular o desgaste acometido no corpo de prova do aço 1020 sobre um ensaio de desgaste abrasivo por lubrificante contaminado.

O quinto capítulo trata das conclusões e análises feitas ao longo da pesquisa, com o intuito de responder a problemática desse trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A fundamentação teórica do tema abordado se baseia nos conceitos tribológicos e suas principais influências nos equipamentos.

2.1 TRIBOLOGIA

A Tribologia envolve estudos do atrito, do desgaste e da lubrificação de corpos e pode ser definida como a ciência e a tecnologia de superfícies que interagem em movimento relativo (HUTCHINGS, 1992).

O atrito e o desgaste não são propriedades intrínsecas dos materiais, mas sim características da interação desses materiais com variáveis operacionais do processo a que estão submetidos, sendo estes responsáveis, respectivamente, por dissipações de energia e matéria. O atrito é a resistência ao deslocamento e é gerado a partir da interação de sólidos em determinadas áreas de contato; já o desgaste é a perda progressiva de material da superfície de um corpo sólido, decorrente do contato e do movimento relativo deste com outro corpo sólido, líquido ou gasoso (ZUM GAHR, 1987).

Os parâmetros estruturais de um sistema tribológico consistem nos componentes em contato e movimento relativo entre si (triboelementos), o elemento interfacial entre as partes de contato e o meio ambiente. A estrutura dos tribossistemas pode ser “fechada” ou “aberta”. Fechado significa que todos os componentes estão envolvidos em uma interação contínua, repetida ou periódica no processo de atrito e desgaste, por exemplo, em rolamentos. Aberto significa que o elemento do tribossistema não está continuamente envolvido no processo de atrito e desgaste e que ocorre um fluxo de materiais para dentro e para fora do sistema, exemplo, peças em usinagem (CZICHOS, 2020).

Na figura 2, os elementos estruturais (1) a (4) são descritos por uma série de propriedades necessárias para cumprir a funcionalidade do tribossistema.

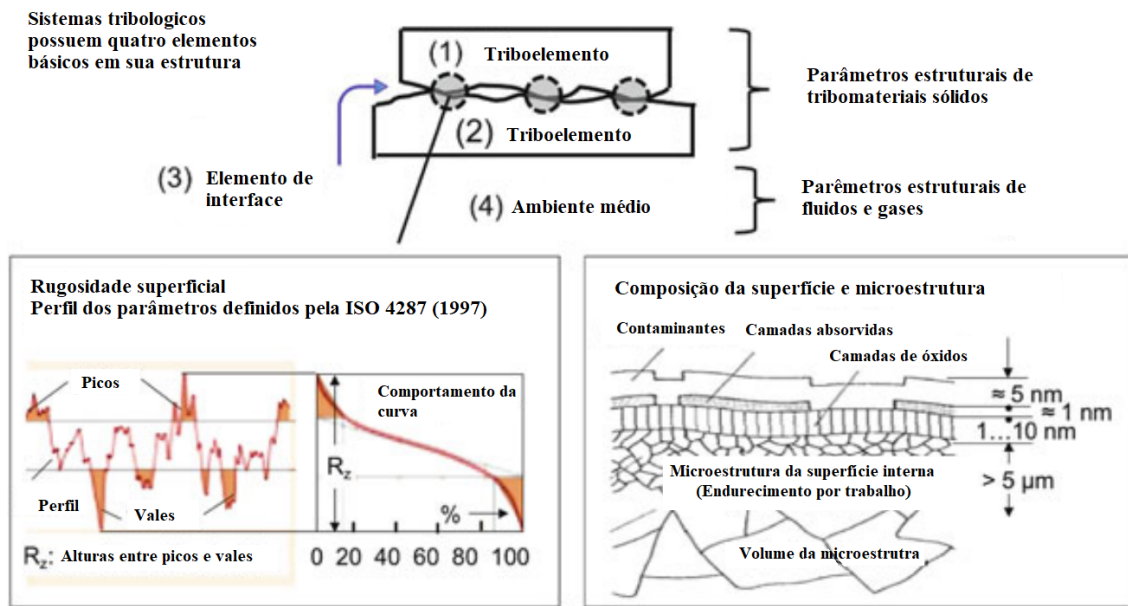


Figura 2: Visão geral dos parâmetros de um tribossistema
Fonte: Adaptado de Czichos (2020)

A figura 2 ilustra as propriedades da superfície, as características de seus picos e vales como comprimento e altura, quanto a composição de sua microestrutura com as camadas que se formam na interface de contato.

- Parâmetros estruturais dos triboelementos (1) e (2) segundo Czichos (2020):
 - Geométricos: geometria, forma, dimensões;
 - Químicos: composição química e composição molecular;
 - Físicos, como condutividade térmica;
 - Mecânicos, como módulo de elasticidade, dureza e tenacidade a fratura.
 - Rugosidade superficial, composição da superfície e microestrutura.
- Parâmetros estruturais dos triboelementos (3) e (4):
 - Químicos, como composição, aditivos, acidez e umidade
 - Físicos, densidade e condutividade térmica
 - Mecânicos: viscosidade e suas características sobre pressão e temperatura

De acordo com Blau (1997), os estudos tribológicos têm sido estudados para: entender o comportamento do desgaste em uma família particular de materiais; auxiliar na seleção de materiais para uma determinada aplicação; compreender os efeitos de certas variáveis num modo particular de desgaste; desenvolver modelos para prever ou descrever o desgaste em tribossistemas específicos.

2.2 FENOMENOS TRIBOLOGICOS

Os processos tribológicos envolvidos durante o contato entre duas superfícies em movimento relativo são bastante complexos, pois envolvem simultaneamente atrito, mecanismos de desgaste e deformação de diferentes níveis e tipos. Atrito e desgaste, como dois tipos de resposta a um tribossistema, estão relacionados entre si, mas uma relação simples e compreensível entre eles não deve ser esperada (KATO,2001). Para um melhor entendimento desses fenômenos, o atrito, os mecanismos de desgaste e a lubrificação serão brevemente discutidos nesta seção.

Desta maneira, conforme Zum-Gahr (1987) um sistema tribológico consiste nas superfícies de dois corpos que se encontram em contato móvel um com o outro e com a área adjacente. O tipo, evolução e extensão do desgaste são determinados pelos materiais e rugosidade da superfície, eventuais materiais intermediários, influências da área adjacente e condições de operação. Na figura 3 ilustra todos esses processos que determinam um sistema tribológico.

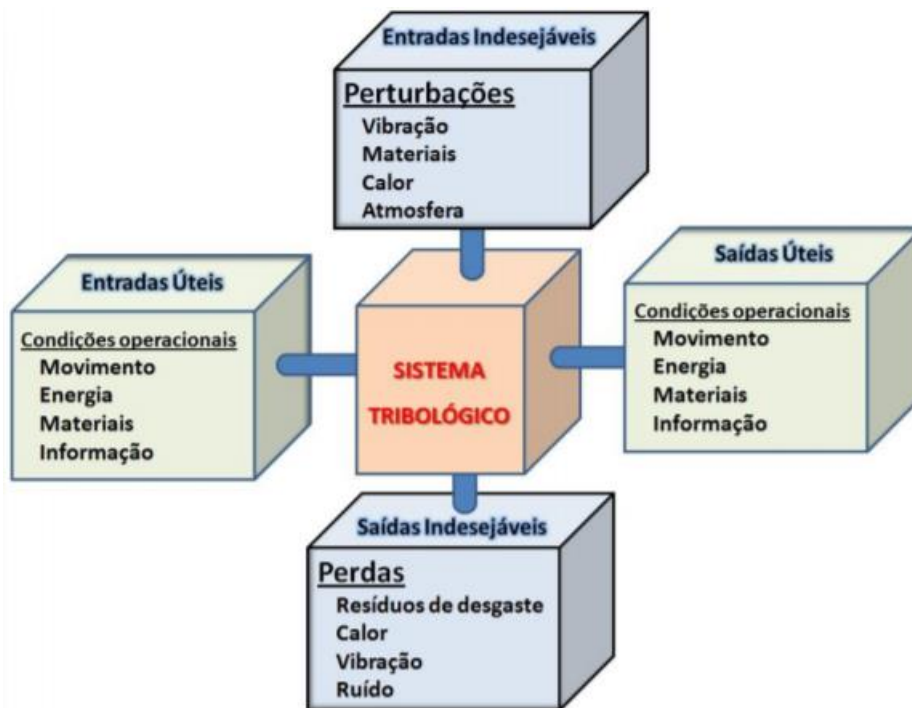


Figura 3: Transformações de energia em um sistema tribológico
Fonte: Adaptado de Zun-Gahr (1987)

A figura 3 ilustra que a finalidade do sistema tribológico é estudar as transformações ocorridas entre as entradas e saídas, correlacionando os distúrbios recorrentes do atrito que é inerente ao sistema e as perdas que são geradas.

2.3 ATRITO

Segundo a norma ASTM G40 (1999) a força de atrito (F) é definida como a força de resistência tangencial à interface entre duas superfícies quando, sob a ação de uma força externa, uma superfície tende a se mover em relação à outra, então:

$$\mu = \frac{F}{N} \quad (1)$$

μ : coeficiente de atrito

F : força de atrito [N]

N : força normal aplicada [N]

O coeficiente de atrito pode ser dividido em estático e cinético (ou dinâmico), sendo o primeiro definido como o coeficiente de atrito correspondente à máxima força de atrito que precisa ser superada para que um movimento macroscópico ocorra e o último é definido como o coeficiente de atrito sob condições macroscópicas de movimento relativo entre as superfícies e representa o atrito que se opõe à continuidade do movimento uma vez que ele tenha se iniciado (RADI,2008).

Conforme Santos (2005), o atrito dentre todas as grandezas ditas como passíveis de serem utilizadas para avaliação em um ensaio tribológico é a que apresenta maior dificuldade em ser obtida. Isto é, como essa força é a reação entre duas superfícies em contato a colocação de sensores para a medição alteraria a grandeza a ser medida. Mesmo parecendo lisas a olho nu, apresentam deformações microscópicas também chamada rugosidade, essas irregularidades que geram uma pressão no local e dificulta o movimento relativo dos corpos.

Para Czichos (2020), uma visão geral do mecanismo de atrito pode ser obtida considerando o balanço de energia do atrito sólido. A energia mecânica associada ao atrito sólido entre dois triboelementos (1), (2) envolvem o seguinte:

- I. Introdução da energia mecânica: formação da área real de contato, crescimento da junção no início do movimento relativo
- II. Processo de transformação:
 - (a) adesão e cisalhamento
 - (b) deformação plástica

- (c) adesão
- (d) histerese e amortecimento
- III. Processo de dissipação
 - (a) processos térmicos
 - (b) contato entre (1) e (2) com tensões residuais, geração de defeitos pontuais e deslocamentos
 - (c) emissões, como calor, ruídos, detritos, triboluminescência.

Pode se observar na figura 4, os parâmetros estruturais envolvidos no mecanismo de atrito em questão:

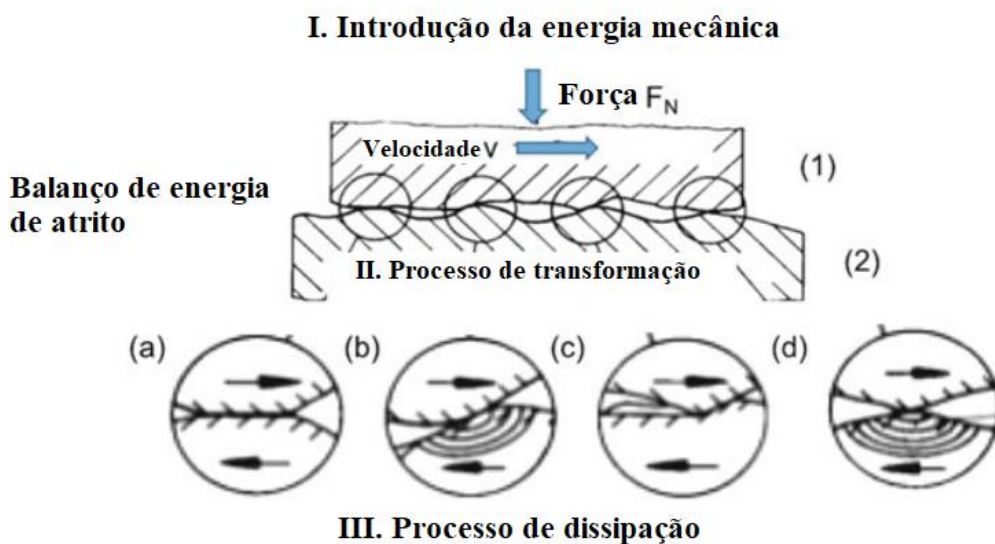


Figura 4: Representação básica dos mecanismos de atrito
 Fonte: Adaptado Czichos (2020)

É observado na figura 4 o contato relativo entre os picos das superfícies em contato gerando os mecanismos de desgaste que será estudo nesse trabalho, é o choque entre essas irregularidades superficiais que geram todas as saídas indesejáveis de um sistema tribológico como: resíduos de desgaste, calor, vibração e ruídos.

2.4 PROCESSOS DE DESGASTE

O desgaste é um fenômeno que pode ser determinado por testes em tribossistemas, onde parâmetros como propriedades da superfície, composição química do material, distância de deslizamento, velocidade e carga aplicada, devem ser analisados para uma melhor compreensão

dos mecanismos de desgaste. Em decorrência é necessário especificar um sistema bem definido de modo a delimitar o campo de validade das propriedades tribológicas (HUTCHINGS, 1992).

Segundo Czichos (2020), o desgaste é o processo de deterioração de uma superfície sólida, geralmente envolvendo perda de substâncias devido ao movimento relativo entre os corpos em contato, isto é, a interação dos elementos do tribossistema. As medidas para quantificar o desgaste são:

- Comprimento do desgaste, W_l : mudanças unidimensionais na geometria de triboelementos em interação perpendicular à sua área de contato comum;
- Área de desgaste, W_q : mudanças bidimensionais de seções transversais de triboelementos em interação perpendicular à sua área de contato comum;
- Volume de desgaste, W_v : mudanças tridimensionais de regiões geométricas de triboelementos adjacentes à sua área de contato comum;

Ainda conforme Czichos (2020), um parâmetro para se medir o desgaste é o coeficiente de desgaste k (ou taxa de desgaste), que é definido como:

$$k = \frac{W_v}{F_n * s} \quad (2)$$

k : taxa de desgaste [$\text{mm}^3/\text{N.m}$]

W_v : volume de desgaste [mm^3]

F_n : carga aplicada [N]

s : distância de deslizamento [m]

De acordo com (Stoeterau,2004) o desgaste como um processo complexo, pode ocorrer de diferentes métodos sendo independentes ou em combinações. Normalmente o desgaste é estudado sobre quatro formas:

- Por adesão;
- Por abrasão;
- Por corrosão;
- Por fadiga superficial.

A figura 5 citada por (KATO,2001) demonstra o desenho esquemático dos quatro modos representativos do desgaste;

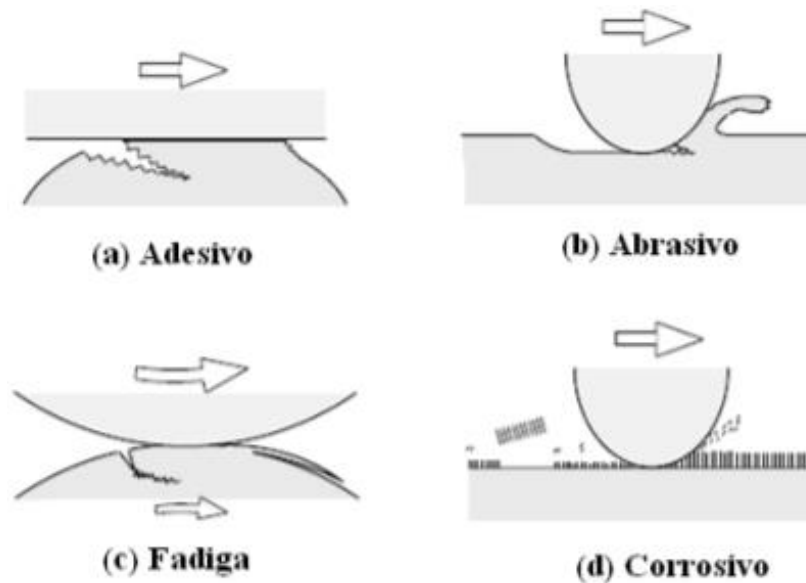


Figura 5: Representação dos mecanismos de desgaste
 Fonte: Adaptado de Kato (2001)

Observa-se na figura 5 o modo como os mecanismos de desgaste irá retirar partículas do material ocasionando os problemas de perda de funcionalidade das peças que estão em contato, gerando os inúmeros prejuízos ao setor industrial pela necessidade de reposição.

De acordo com Zum Ghar (1987) esses mecanismos de desgaste podem aparecer de forma combinada em um sistema tribológico e são dependentes de vários fatores importantes, como a dureza dos materiais envolvidos, tenacidade, módulo de elasticidade, tensão de escoamento, dureza, propriedades relativas a fadiga, microestrutura, integridade superficial, geometria e pressão de contato, temperatura, estado de tensão, coeficiente de atrito, distancia de escorregamento, velocidade relativa, lubrificantes, contaminantes e a atmosfera ambiente.

2.4.1 DESGASTE ADESIVO

O desgaste adesivo pode ocorrer quando uma superfície desliza sobre outra e tem interação entre as irregularidades superficiais dos dois corpos. Nesse caso geram-se forças de atração nos pontos de contato entre os picos, que podem ocorrer em caráter covalente, iônico, metálico ou pelas forças de Van der Waals (SCHUITEK,2007). Como a área de contato é muito pequena, desenvolve-se localmente altas pressões de contato que provocam deformação plástica, adesão e formação de junções. O aumento de temperatura nesse caso é bem perceptível, pois após o contato as altas pressões exercidas entre os pares, o material aquece e, em alguns casos, chega a se fundir.

O rompimento das asperezas soldadas provoca severo dano a superfície, em geral sob a forma de crateras visíveis (macroscópicas). Este tipo de desgaste pode ser um problema quando se tem dois materiais de mesma natureza em contato, como por exemplo aços e suas ligas, ou quando ocorre uma lubrificação deficiente e temperaturas altas, ou velocidades de escorregamento elevadas (RABINOWICZ,1994).

Conforme diz Stoeterau (2004) se as superfícies forem submetidas a um movimento relativo de escorregamento, as junções soldadas devem ser rompidas. Se elas romperão na interface original ou em um ponto no interior das irregularidades dependerá das condições superficiais, distribuição de temperatura, características de encruamento, geometria local e distribuição de tensão. Se a junção é rompida fora da interface original, uma partícula de uma das superfícies é transferida para a outra, iniciando o processo de desgaste por adesão, conforme mostra a figura 6.

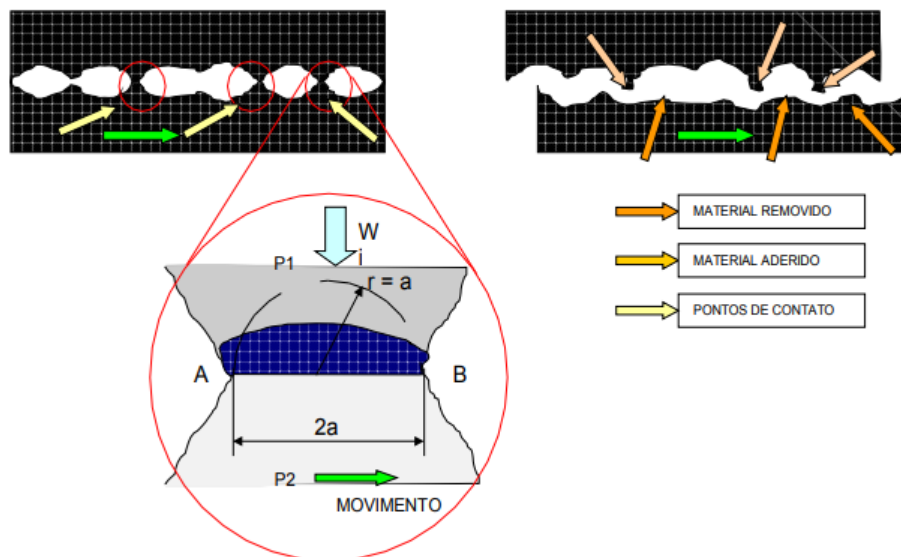


Figura 6: Contato de transferência de partículas no desgaste por adesão
Fonte: Stoeterau (2004)

Na figura 6 pode-se observar as etapas:

1. Superfícies carregadas em contato. A carga aplicada causa plastificação e soldagem a frio.
2. Ruptura na interface sem transferência de partículas.
3. Ruptura da aspereza abaixo da junção soldada, com conseqüente transferência de partícula.

2.4.2 DESGASTE ABRASIVO

Como foi introduzido nesse trabalho, o desgaste abrasivo é a principal preocupação em vários setores da indústria que trabalham com matérias-primas abrasivas. Na maioria das vezes esse mecanismo de desgaste é inevitável e causa grandes prejuízos com a necessidade de parar as linhas de produção para realizar a troca de equipamentos.

Existem duas situações gerais para descrever o desgaste abrasivo. No primeiro caso uma superfície mais dura em contato e movimento relativo sobre a outra arranca uma porção de material (abrasão de dois corpos), em operações mecânicas como retificação e usinagem são exemplo disso, e no segundo caso, a superfície dura é um terceiro corpo, geralmente uma pequena partícula abrasiva, presa entre as duas superfícies e suficientemente mais dura, é capaz de desgastar uma ou ambas as superfícies em contato (abrasão de três corpos), por exemplo, isso acontece no processo de polimento. (BHUSHAN, 2013).

Na figura 7, pode-se observar como esses tipos de desgaste ocorrem nos materiais:

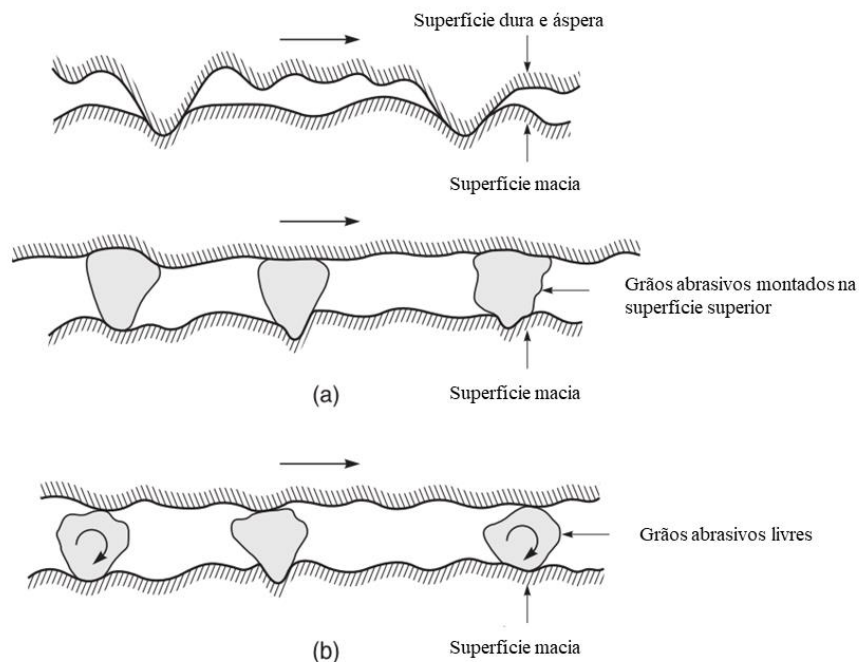


Figura 7: Esquema de (a) uma superfície dura e áspera e uma superfície montada com deslizamento de grãos abrasivos em uma superfície mais macia, e (b) grãos abrasivos livres presos entre as superfícies com pelo menos uma das superfícies mais macias que os grãos

Fonte: Adaptado Bhushan (2013,329p)

Segundo Gregolin (1990) existem diferentes micromecanismos de desgaste abrasivo que foram observados e identificados da seguinte maneira.

- **Mecanismos dúcteis:** sulcamento e microcorte;
- **Mecanismos frágeis:** microtrincamento e lascamento.

O sulcamento é resultante da ação de partículas abrasivas deformando plasticamente a superfície de um material dúctil, formando um sulco em seu trajeto. O material acumulado à frente da partícula escoam para as bordas laterais do sulco e não há propriamente perda de massa durante esse processo, entretanto, a interação de várias partículas abrasivas com a superfície provoca um resultado globalizado de remoção de material. Como observado na figura 8:

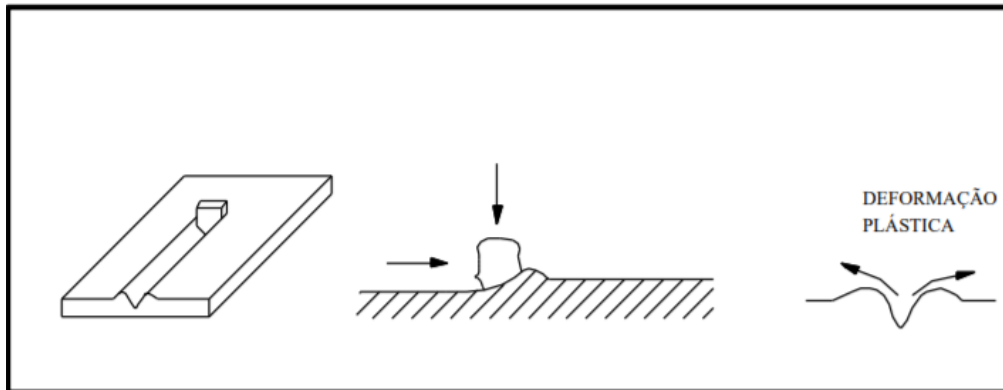


Figura 8: Esquema ilustrativo do mecanismo de desgaste abrasivo por sulcamento.
Fonte: Gregolin (1990)

No microcorte quando as tensões de cisalhamento conferidas pelo deslocamento da partícula abrasiva forem suficientemente elevadas para ocasionar a ruptura do material mais dúctil, ocorre a formação de cavacos que são arrancados da superfície do mesmo. Ver figura 9:

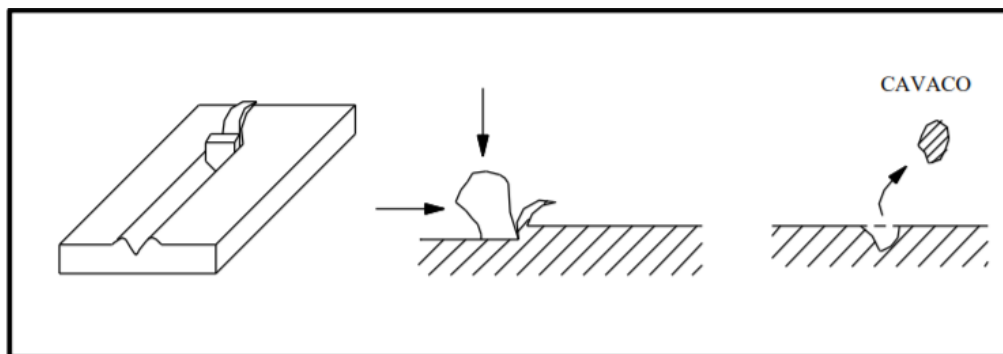


Figura 9: Esquema ilustrativo do mecanismo de desgaste abrasivo por microcorte.
Fonte: Gregolin (1990)

O microtrincamento ou lascamento é um processo de fragmentação da superfície frágil, pela formação e crescimento de trincas, devida à ação da partícula abrasiva, as trincas vão se formando até se encontrarem e remover uma quantidade de material. Como mostrado na figura 10:

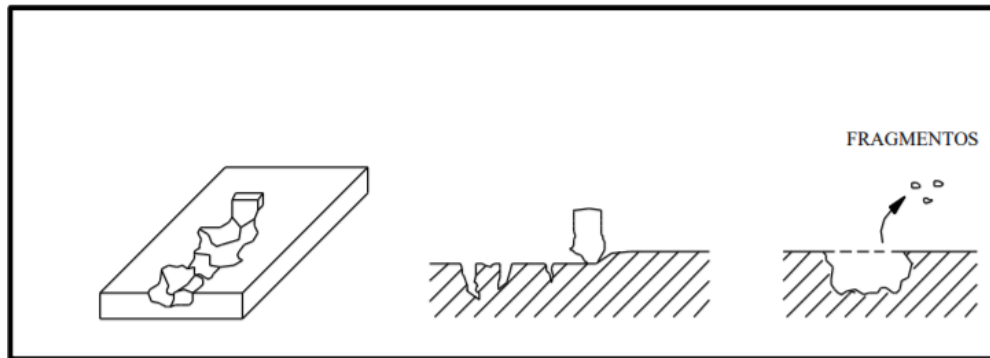


Figura 10: Esquema ilustrativo do mecanismo de desgaste abrasivo por microtrincamento
Fonte: Gregolin (1990)

O fenômeno interfacial envolvido é complexo e os vários mecanismos de desgaste podem ocorrer de forma combinada, somando-se a dependência de diferentes fatores que podem favorecer maior ou menor severidade no desgaste. (GREGOLIN,1990).

De acordo com (Hutchings,1992), a taxa de desgaste gerada pelas partículas abrasivas que atuam no sistema pode ser definida pela equação de Archard para o desgaste abrasivo.

$$Q = K \frac{F}{H} \quad (3)$$

Onde:

Q : Taxa de desgaste em volume de material por distância de deslizamento $[\frac{mm^3}{m}]$

K : Valor adimensional menor que 1 que mede a severidade do desgaste

F : Força total aplicada sobre o sistema

H : Dureza do material desgastado

Para o desgaste abrasivo por riscamento, K está entre $\cong 5.10^{-3}$ e $\cong 50.10^{-3}$ e, para o desgaste abrasivo por rolamento, entre $\cong 0, 50.10^{-3}$ e $\cong 5.10^{-3}$ (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:

$$Q = k. Fn \quad (4)$$

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

2.5 ABRASÔMETRO ASTM G65 - 16

Um dos métodos mais comuns de simular o desgaste abrasivo é mostrada na figura 11.

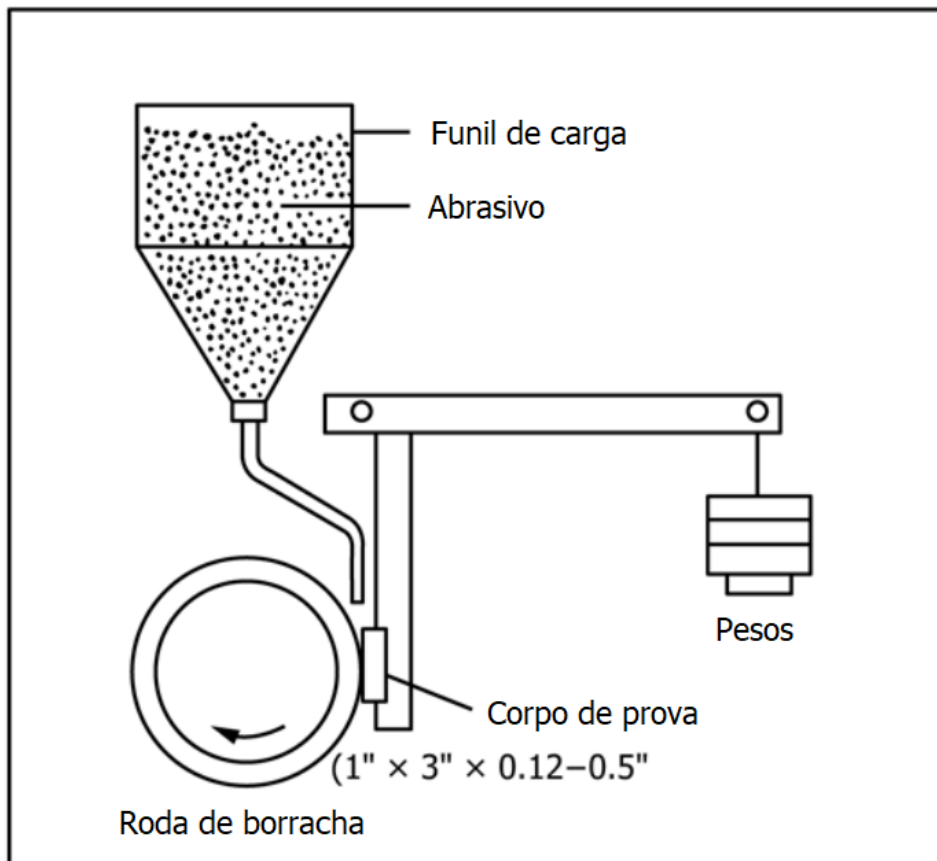


Figura 11: Abrasômetro do tipo roda de borracha
Fonte: Adaptado ASTM G65 (2016)

A figura 11 mostra como é o funcionamento do equipamento que simula o desgaste abrasivo a 3 corpos proposto pela norma ASTM G65-16.

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 aplica 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 a cima 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, 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).

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 5 possa ser corrigido. Para esta correção, utiliza-se a equação 5:

$$Volume\ perdido\ ajustado\ [mm^3] = \frac{228,6\ [mm]}{Diâmetro\ após\ ensaio\ [mm]} \times Volume\ perdido\ [mm^3] \quad (6)$$

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
E	130 (30)	1000	718	2360

Fonte: Adaptado ASTM G65 (2016)

2.6 LUBRIFICAÇÃO

O lubrificante tem como principal função criar uma película de óleo entre as superfícies em movimento relativo para reduzir o atrito e o desgaste, ele diminui bastante a entrada de contaminantes entre as superfícies e evita a corrosão, também diminui a temperatura entre os corpos que se movem.

Um dos parâmetros mais importante para a caracterização física dos lubrificantes é a viscosidade. Conforme Maru (2003), este parâmetro nos dá uma medida da resistência do fluido ao cisalhamento e pode ser definido como a tensão de cisalhamento em um plano no fluido por unidade de gradiente de velocidade normal ao plano. A viscosidade pode ser expressa em termos de viscosidade cinemática (em [mm²/s] ou [cSt]) ou viscosidade absoluta (ou dinâmica, em [Pa.s]).

Hutchings (1992) define a viscosidade em fluidos newtonianos, em termos da deformação por cisalhamento γ , conforme a equação (6):

$$\tau = \eta \frac{d\gamma}{dt} \quad (6)$$

Onde:

τ : tensão de cisalhamento [Pa]

η : viscosidade dinâmica [Pa.s]

$d\gamma/dt$: taxa de deformação for cisalhamento

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

$$Z = \frac{\eta}{\rho} \quad (7)$$

Sendo:

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

ρ : massa específica [kg/m³]

Normalmente a viscosidade dos fluidos lubrificantes diminui com o aumento da temperatura, e também tem uma característica de comportamento em que aumentam sua viscosidade em função do aumento da pressão de trabalho, esse tipo de comportamento é característica dos fluidos classificados com newtonianos (MARU, 2003).

De acordo com Blau (2009), a lubrificação não envolve apenas a seleção e formulação de lubrificantes, mas também o projeto da geometria de contato e os métodos para distribuí-los, filtrá-los e condicioná-los. De um modo geral, lubrificantes podem ser sólidos, líquidos, pastosos ou gases. Lubrificantes sólidos podem ser na forma de filmes finos, fases constituintes em matérias compostos ou pós.

Os lubrificantes líquidos são formulados a partir de um óleo-base mais aditivos. Cada aplicação requer uma quantidade e um tipo específico. À medida que os lubrificantes executam o seu trabalho, a carga de aditivo vai sendo consumida e seus níveis decrescendo, deixando os sistemas desprotegidos. A análise determina a carga aditiva existente nos lubrificantes para verificar se o óleo ainda mantém as características necessárias à proteção das peças internas. Desse modo, a troca do lubrificante somente será realizada quando realmente for necessária (CARVALHO, 2015).

Na tabela 2 estão listados os principais tipos de aditivos nos lubrificantes e suas propriedades ao qual são destinados.

Tabela 2: Principais aditivos utilizados em lubrificantes

Tipo de aditivo	Origem química	Propriedade
Detergente básico	Sulfonatos, fenatos ou salicilatos de cálcio, bário ou magnésio	Neutralizar ácidos e prevenir formação de gomas e lacas
Antiespumante	Compostos de silicones ou metacrilatos	Prevenir formação de espuma em condições de agitação severa
Dispersante de cinzas	Éster poli-isobutenil succínico ou succinimidas	Previne depósitos de fuligem e oxidação
Antioxidante	Ditio-ófosfato de zinco, compostos fenólicos, olefinas e salicilatos metálicos	Prevenir a oxidação e o espessamento do lubrificante
Antidesgaste e extrema pressão	Compostos orgânicos de enxofre e fósforo, compostos clorados e ditiofosfato de zinco	Prevenir o desgaste dos comes, ressaltos e excêntricos
Anticorrosivo	Sulfonatos de cálcio, sódio ou bário, amins orgânicas etc	Prevenir a corrosão
Melhorador da viscosidade	Polímeros como o poliestireno e copolímeros derivados de etileno e propileno	Reduzir a perda de viscosidade em alta temperatura
Melhorador do ponto de mínima fluidez	Metalicratos	Aumento das propriedades de fluidez a baixas temperaturas

Fonte: Almeida (2017)

Os lubrificantes semissólidos constituem um grupo de lubrificantes formado pelos diversos tipos de graxas vastamente aplicadas nos casos em que a aderência às superfícies das peças em contato de máquinas, equipamentos e veículos é necessária. São utilizados também em conjuntos mecânicos com elementos rolantes, como mancais de rolamentos. Nesse caso, a

graxa se liquefaz no interior do conjunto por causa do aumento da temperatura causado pelo movimento de rotação e volta a se tornar pastosa com o equipamento em repouso (ALMEIDA, 2017).

Existem alguns tipos de graxas existentes no mercado atualmente, os autores Lacerda e Silva (2019) explicam alguns tipos de graxas encontradas:

- Graxa azul (Sabão de lítio): É recomendada para múltiplas aplicações, produzida com sabão de lítio e óleo de viscosidade média, conta com aditivos para assegurar boa estabilidade mecânica, proteção contra oxidação e resistência ao calor moderado (LACERDA e SILVA, 2019);
- Unigrax CA (Base de cálcio): A Unigrax CA é uma graxa à base de cálcio, hidro-repelente, fabricada com óleo lubrificante de alta viscosidade, tendo uma cor castanha escura e grande adesividade. Recomendada para lubrificação das articulações de chassis de caminhões, automóveis, tratores, motocicletas, mancais de deslizamento (LACERDA e SILVA, 2019).
- Graxinha (Hidróxido de cálcio): A graxa preta tem em sua composição óleo mineral, aditivo de adesividade e hidróxido de cálcio, sendo recomendada para lubrificação geral de automóveis e uso doméstico. Apresenta-se grande flexibilidade de aplicações, excelente resistência à oxidação e à corrosão e boa adesividade a diversas superfícies (LACERDA e SILVA, 2019).

A escolha de um lubrificante em detrimento do outro depende sempre das condições de aplicação. É necessário, também, levar em conta todos os fatores envolvidos o que inclui desde a armazenagem até as condições de uso do lubrificante, também as suas propriedades físicas, químicas, mecânicas, elétricas e tribológicas que são essenciais (ERDEMIR, 2004).

2.6.1 CONTAMINAÇÃO DE LUBRIFICANTES

A contaminação do lubrificante ocorre quando qualquer material diferente que se misture ao óleo possa causar danos ao equipamento. A contaminação pode ser interna ou externa. Na contaminação interna ocorre quando está havendo um desgaste entre as superfícies lubrificadas. E a contaminação externa ocorre quando há introdução de qualquer material diferente do óleo lubrificante no sistema (CARRETEIRO e BELMIRO, 2006).

Ainda conforme Carreteiro e Belmiro (2006), existem três tipos de lubrificantes:

- Contaminantes Sólidos: são partículas de areia, cavacos dos elementos lubrificadas ou qualquer material que esteja em contato com o lubrificante.
- Contaminantes líquidos: A água, produtos líquidos que estejam sendo produzidos ou transportados e outros tipos de óleos que não sejam compatíveis com o óleo lubrificante do sistema.
- Contaminantes gasosos: O ar atmosférico com umidade ou qualquer gás que se misture com o óleo lubrificante.

A decomposição química dos óleos em serviço começa com a oxidação, à medida que a degradação molecular natural do óleo avança, sua viscosidade cai, resultando em uma fina camada de óleo que não pode mais formar uma barreira eficaz entre os componentes móveis do sistema (PESKOE-YANG, 2020).

Ainda segundo Peskoe-Yang (2020), intrusões do mundo externo podem precipitar a degradação do óleo lubrificante muito antes da vida útil recomendada. A introdução de umidade de fora pode estimular a corrosão de componentes metálicos, que apresentam maior risco de desintegração e contaminação adicional do óleo com sólidos abrasivos. Partículas soltas de ferrugem podem se espalhar por todo o sistema, alterando sua composição e acelerando o processo de desgaste abrasivo dos componentes lubrificadas.

Rensseler (2021) afirma que existem quatro meios principais de contaminação, que podem ser evitados ao se atentar para os processos de produção, manuseio e troca do óleo lubrificante, são eles:

1. Contaminação na produção do lubrificante;
2. Contaminação durante os processos de armazenamento e transporte;
3. Contaminação no procedimento de aplicação do óleo;
4. Contaminação durante a troca do óleo lubrificante, que podem ser:
 - (a) Tampas e escotilhas fechadas incorretamente;
 - (b) Vazamento nas vedações;
 - (c) Adição de óleos não filtrados;
 - (d) Aplicação de óleos não compatíveis;
 - (e) Entrada de água;
 - (f) Inclusão de contaminantes sólidos.

2.7 GESTÃO DA LUBRIFICAÇÃO

De acordo com Queijo *apud* SKF Group (2017), a lubrificação ideal é a conjugação de cinco fatores: tipo de lubrificante certo, quantidade certa, condição certa, local certo e ocasião certa. Um plano de lubrificação pode aumentar a confiabilidade, produtividade, disponibilidade e durabilidade dos equipamentos. Reduzindo o consumo de energia e desgaste devido à fricção, manutenção e custos de reparação.

Segundo Almeida (2017), o plano de lubrificação deve registrar todas as máquinas que devem ser lubrificadas para controle na administração da manutenção preventiva com as devidas identificações. Esse documento, além de obrigatório nas empresas, é extremamente útil na prática da manutenção preventiva, pois permite o controle e o planejamento de quais máquinas e equipamentos deveram ser lubrificados, bem como a periodicidade dos procedimentos de lubrificação. Outro fator importante para um programa de lubrificação eficiente é a seleção adequada e a limpeza do óleo lubrificante.

Na tabela 3 verifica-se um exemplo de um plano de lubrificação comumente usados pelas empresas para padronizar os procedimentos operacionais de lubrificação do equipamento.

Tabela 3: Exemplo do plano de manutenção

(Nome da Empresa)					
Plano de Lubrificação					
Máquina: Torno mecânico	Marca: Romi	Modelo: Centur 30	Ano de fabricação: 2009	Setor: Usinagem	Aprovação: Gerente de manutenção
Partes a serem lubrificadas	Frequência	Especificação do lubrificante		Observações	
Cabeçote fixo (engrenagens de mudança do RPM)	A cada 12 meses	Óleo Lubrificante (Shell Omala S2G® ou Shell Omala S4GX®)		Verificar o nível no visor	
Guias lineares do barramento	Diariamente	Óleo lubrificante (Shell Tonna S2M®)		Aplicar uma película com trincha após a limpeza da máquina	
Avental do Carro principal	A cada 18 meses	Óleo Lubrificante (Shell Omala S2G ou Shell Omala S4GX)		Verificar o nível no visor	
Caixa Norton	A cada 18 meses	Óleo Lubrificante (Shell Omala S2G ou Shell Omala S4GX)		Verificar o nível no visor	
Guias lineares do carro transversal	Diariamente	Óleo lubrificante (Shell Tonna S2M)		Aplicar uma película com trincha após a limpeza da máquina	
Guias lineares do carro superior	Diariamente	Óleo lubrificante (Shell Tonna S2M)		Aplicar uma película com trincha após a limpeza da máquina	

Fonte: Almeida (2017)

De acordo com Naele (2001), um plano efetivo de lubrificação deve seguir algumas considerações, por meio de um plano de lubrificação eficiente com três passos básicos:

- Mapeamento detalhado das máquinas e equipamentos, uma descrição dos itens a serem lubrificados, verificação dos lubrificantes utilizados versus os recomendados, frequência e método de aplicação;
- Verificação dos lubrificantes utilizados para definir os tipos de lubrificantes apropriados de acordo com a especificação do fabricante e as restrições da produção;
- Definição do método e frequência de aplicação.

No presente trabalho, a fundamentação teórica é de grande importância para que possa solucionar o problema proposto no capítulo 1. As definições sobre tribologia e sistemas tribológicos bem como os conceitos de desgaste e lubrificação fornecem conceito teórico para aplicar na prática e obter os resultados para as possíveis soluções do problema.

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 e análise dos resultados obtidos. Segundo Assis (2021, p.24) a metodologia “consiste na explicação minuciosa, detalhada, rigorosa e exata de toda a ação desenvolvida e de tudo aquilo que se utilizou no trabalho de pesquisa”.

3.1 TIPO DE PESQUISA

De acordo com Assis (2021), a pesquisa pode ser dividida em dois métodos importantes da investigação científica segundo sua natureza, o método qualitativo e o método quantitativo.

Pesquisa qualitativa: Para Gil (2008), alguns *softwares* podem fazer parte da análise qualitativa, mas o elemento humano é fundamental para o desenvolvimento de um processo.

Pesquisa quantitativa: Conforme Gil (2008), 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 4 e 5 apresentam uma melhor visualização e entendimento acerca do assunto:

Tabela 4: Tipos de pesquisa

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 Vergara (2010)

Tabela 5: Tipos de 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
Ex post facto	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...

Fonte: Adaptado Vergara (2010)

Com base na bibliografia sobre metodologia de pesquisa, pode-se considerar o presente trabalho com natureza explicativa. Quanto aos procedimentos técnicos utilizados é definida como bibliográfica 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 aço 1020 e sua resistência ao desgaste em casos práticos.

3.2 MATERIAIS E MÉTODOS

No presente estudo foram utilizados livros, teses, dissertações e revistas técnicas sobre os fenômenos tribológicos e seus efeitos sobre os sistemas mecânicos que estão envolvidos.

Em seguida foi realizado o procedimento experimental, com caracterização e preparação do corpo de prova de aço 1020; a definição do lubrificante foi feita fundamentada na pesquisa de suas propriedades ideais para o tipo de teste. Seguindo as etapas da norma ASTM G65 para ensaios de desgaste abrasivo foram realizados dois ensaios, um com o corpo lubrificado e outro a seco, a fim de se comparar os resultados obtidos para uma análise da taxa de desgaste aferida quando o material está em contato e movimento relativo com o lubrificante contaminado. Utilizando uma balança de precisão é realizado a pesagem dos corpos antes e após os ensaios para avaliação da perda de massa e cálculo do coeficiente de desgaste adimensional, então os dados são exportados para uma planilha do Microsoft Excel obtendo se os resultados.

A figura 12 mostra o fluxograma contendo o passo a passo do procedimento experimental.

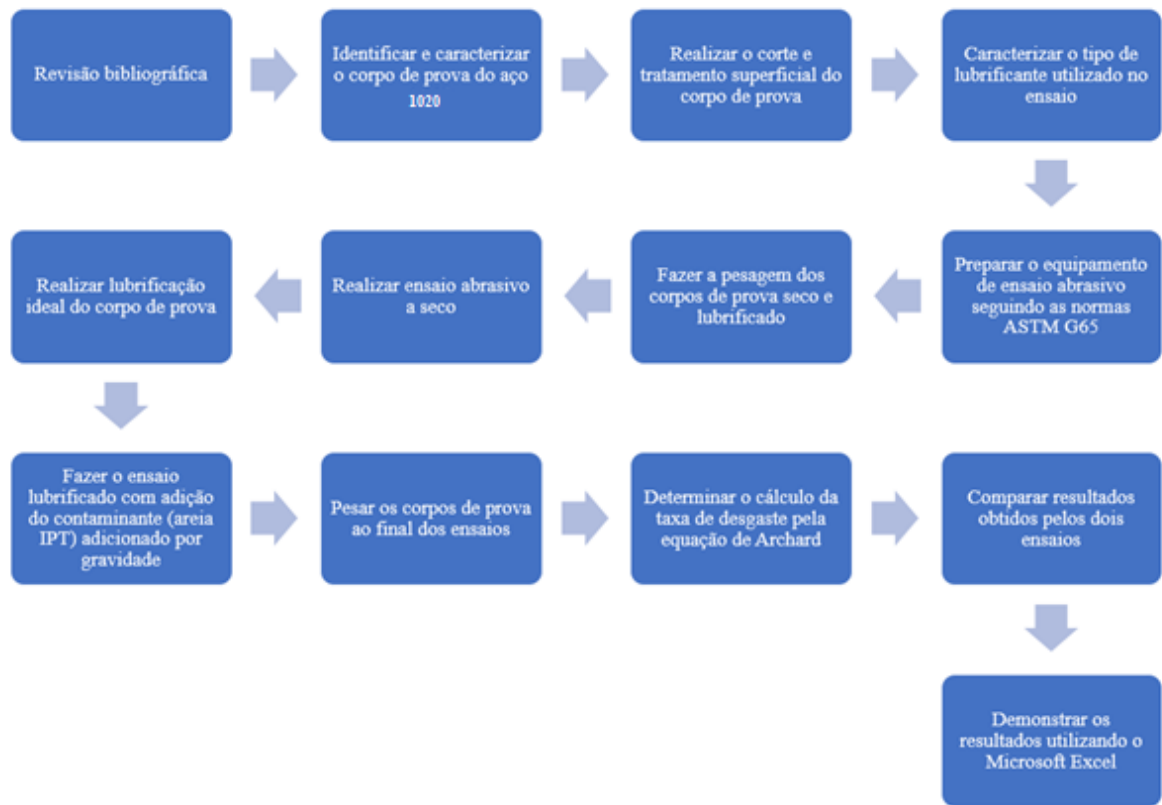


Figura 12: Fluxograma do procedimento experimental
 Fonte: Pesquisa direta (2021)

Os materiais utilizados no presente trabalho foram todos aqueles necessários para se realizar o procedimento experimental em laboratório.

Na tabela 6, temos os instrumentos e materiais utilizados para a realização do trabalho.

Tabela 6: Instrumentos e materiais utilizados

Instrumentos	Materiais
Máquina de teste para ensaio abrasivo ASTM G65	Graxa de Lítio
Balança de precisão	Areia IPT n. 100
Durômetro Vickers	Aço 1020
Máquina de corte	

Fonte: Pesquisa direta (2021)

3.3 VÁRIAVEIS 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 7.

Tabela 7: Variáveis e indicadores

Variáveis	Indicadores
Dureza do corpo de prova aço 1020	Dureza Vickers HV
Peso	Kg
Volume	m ³
Rugosidade	μm
Temperatura do corpo de prova e lubrificante	°C
Viscosidade do lubrificante	cSt
Coeficiente de desgaste	Adimensional
Taxa de desgaste	mm ³ / unidade de deslizamento
Fluxo de areia (vazão do abrasivo)	g/min
Tempo	Segundos
Carga aplicada	130N
Rotação da rota de borracha	210 rpm
Revolução	6000 ciclos
Distancia de deslizamento	4309m
Tipo de desgaste	Abrasivo a 3 corpos

Fonte: Pesquisa direta (2021)

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 livros, teses, dissertações de outros autores e observação direta dos fenômenos do desgaste. Utilizando-se a norma ASTM

G65, 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 do pacote office da Microsoft.

Para comparação e análise dos dados foi utilizado a equação (3) de Archard e equações (5) e (6) da norma ASTM G65 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 DISCUSSÕES

O objetivo geral do trabalho foi avaliar qual a taxa de desgaste sofrida pelo aço SAE 1020, previamente lubrificado, por uma graxa a base de sabão de lítio. Para alcançar o objetivo da pesquisa foi utilizado o equipamento abrasômetro normatizado pela ASTM G65-16, como demonstra a figura 13.



Figura 13: Abrasômetro ASTM G65
Fonte: Gonçalves (2017)

Na figura 13 é observado a configuração do abrasômetro utilizado nos testes que segue as dimensões descritas na norma ASTM G65-16.

Os objetivos específicos propostos foram alcançados como demonstrado nos Capítulo 2 e com os materiais e métodos que serão apresentados a seguir.

4.1 PREPARAÇÃO DOS PARAMETROS DO ENSAIO E DAS AMOSTRAS SEGUNDO A NORMA ASTM G65-16

O material utilizado nos corpos de prova foi chapa de aço SAE 1020 que é amplamente utilizado em componentes mecânicos. Esse 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, podendo ser observado na figura 14.



Figura 14: Corpos de prova aço SAE 1020
Fonte: Pesquisa direta (2021)

A preparação dos corpos de prova foi realizada em um centro de usinagem onde foram feitos os cortes e aplainamentos das superfícies de dimensões 76x25x3,2mm conforme padrão estabelecido pela norma ASTM G65-16 para um posterior lixamento. A máquina utilizada para preparação superficial das amostras foi a lixadeira metalográfica AROPOL-2V da Arotec, utilizando-se a sequência de lixas de carbeto de silício de números 100, 220, 320 e 400. Para uma melhor fixação do lubrificante na superfície da amostra foi decidido parar o lixamento no número 400, que se aproxima das condições da superfície dos materiais utilizado na prática pelos equipamentos, sendo materiais robusto que não possuem um tratamento superficial

refinado, aumentando assim sua taxa de desgaste abrasivo a 3 corpos. A figura 15 ilustra o equipamento utilizado para realizar o lixamento com água.



Figura 15: Lixadeira metalográfica
Fonte: Pesquisa direta (2021).

Após a preparação superficial das amostras foi realizado o teste de microdureza Vickers no aparelho Microdurômetro Emcotest, com faixa de cargas de 0.01 a 10 Kgf. Usando um indentador de diamante, foi aplicada uma carga definida fazendo uma penetração da amostra com formato de um losango, onde suas diagonais são medidas para definir o valor da microdureza na superfície das amostras. Foram realizados 3 testes nas duas amostras que apresentaram o mesmo valor médio de 185HV0,5. O valor das microdurezas na superfície das amostras teve um pequeno aumento em relação ao aço SAE 1020 convencional por causa do processo de aplainamento realizado na preparação das amostras que devido ao encruamento sofrido na usinagem teve um pequeno acréscimo da microdureza superficial. O aparelho utilizado está representado na figura 16.



Figura 16: Microdurômetro Vickers
Fonte: Pesquisa direta (2021)

Para lubrificação da amostra foi utilizada a graxa a base de sabão de lítio na cor castanha TECNOGREASE MP EP 2 com grau de consistência NLGI 2 e viscosidade a 40°C de 150 cSt, possui aditivos de extrema pressão, anticorrosivos e antioxidante. Essa graxa é amplamente utilizada nas indústrias na lubrificação de mancais e rolamentos, eixos e engrenagens onde ocorrem muitos processos de abrasão a 2 e 3 corpos. O corpo de prova foi lubrificado utilizando um pincel para que toda a superfície fosse recoberta com a graxa.

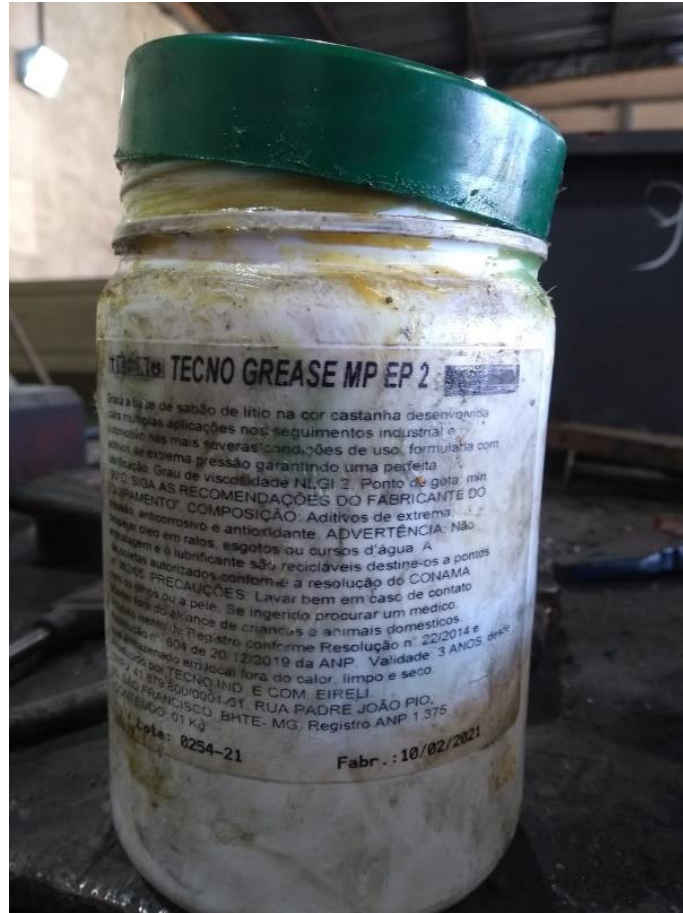


Figura 17: Graxa a base de sabão de lítio
Fonte: Pesquisa direta (2021)

As amostras foram pesadas utilizando a balança analítica da marca Sartorius com precisão de 4 casas decimais. Os resultados dos pesos das amostras foram: 80,9332g para a amostra 1 que foi feito o ensaio lubrificado, 80,6018g para a amostra 2 que foi realizado o ensaio a seco.

Dentre os parâmetros listados na tabela 1, pela norma, foi escolhido o procedimento “A” que é um ensaio severo que lista materiais de baixa a extrema resistência abrasiva. 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. Conforme visto na figura 18.



Figura 18: Areia normal brasileira (IPT) n. 100
Fonte: Pesquisa direta (2021)

O tempo de ensaio no procedimento escolhido é de 6000 ciclos em 30 minutos para uma roda que gira a 200 rpm, reajustando o cálculo para nossos parâmetros com um motor de 210 rpm, o tempo para 6000 ciclos é reduzido para 28,6 minutos.

Após todos os procedimentos as 2 amostras foram submetidas ao ensaio. Durante o ensaio foram realizadas algumas paradas a cada 5 minutos para que a borracha e o corpo de prova pudessem esfriar, evitando que a borracha esquentasse à ponto de diminuir sua dureza e interferir nos resultados finais dos testes.

4.2 CÁLCULO DA TAXA DE DESGASTE E COMPARAÇÃO

Dividindo a equação (6) de volume perdido ajustado da norma ASTM G65-16 e a distância de deslizamento do procedimento “A” da tabela 1, encontra-se a taxa de desgaste da equação Archard (3) então é calculado o “K”, coeficiente de desgaste admissional:

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

Fazendo o cálculo para as duas amostras temos:

$$Q_1 = 0,2314 \frac{\text{mm}^3}{\text{m}}$$

$$Q_2 = 0,2637 \frac{\text{mm}^3}{\text{m}}$$

As tabelas 8 e 9 mostram os respectivos resultados para cada amostra. Para os valores da taxa de desgaste foram utilizados a equação 3 (equação de Archard), e para o volume retirado em mm³ foi utilizada a equação (5) e (6) da norma ASTM G65-16 para o ajuste.

Tabela 8: Dados amostrais amostra 1

Amostra 1 Lubrificada	
Massa Inicial	80,9332 g
Massa Final	72,5217 g
Diâmetro da roda antes do ensaio	224,2 mm
Diâmetro da roda após o ensaio	224 mm
Dureza Vickers	185 HV0,5
Densidade	7,87 g/mm³
Volume perdido ajustado	1089,781 mm³
Taxa de desgaste	0,2314 mm³/m
Coeficiente de desgaste K	0,36

Fonte: Pesquisa direta (2021)

Tabela 9: Dados amostrais amostra 2

Amostra 2	
Massa Inicial	80,6018 g
Massa Final	71,0320 g
Diâmetro da roda antes do ensaio	224 mm
Diâmetro da roda após o ensaio	223,8 mm
Dureza Vickers	185 HV0,5
Densidade	7,87 g/cm³
Volume de desgaste ajustado	1242,065 mm³
Taxa de desgaste	0,2637 mm³/m
Coefficiente de desgaste K	0,41

Fonte: Pesquisa direta (2021)

É possível observar nas tabelas 8 e 9 a grande perda de material durante o teste de abrasão, essa perda elevada é devido ao acabamento final da amostra não estar polida o que aumenta consideravelmente seu processo de desgaste devido a abrasão a 3 corpos sofridas pelos picos rugosos na superfície das amostras.

Após os resultados obtidos a figura 19 mostra o comparativo feito entre a amostra 1 lubrificada e a amostra 2 que foi ensaiada a seco.

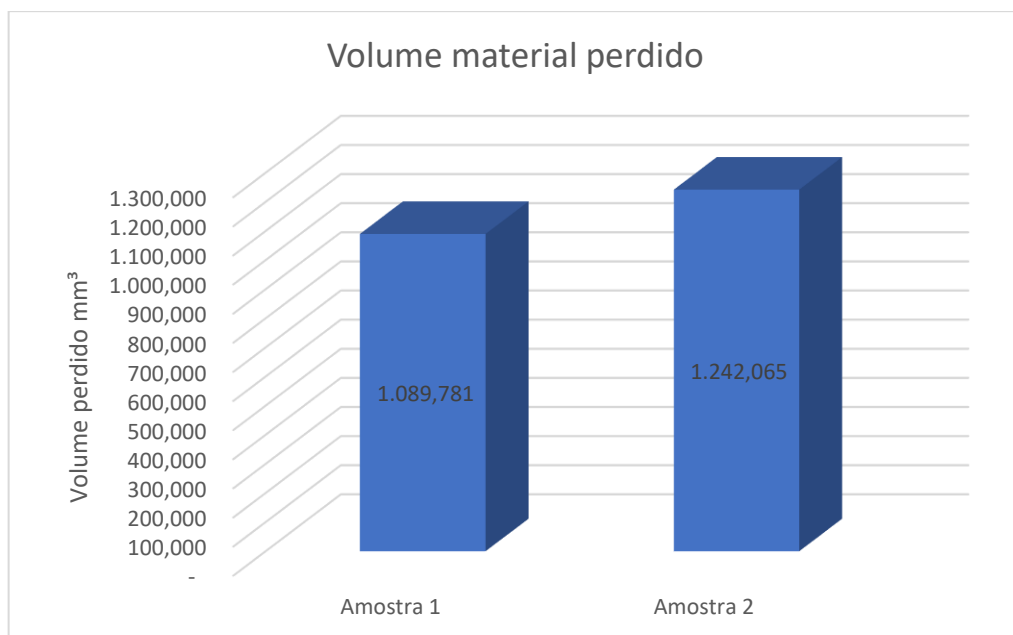


Figura 19: Gráfico comparativo entre o volume perdido pelas duas amostras

Fonte: Pesquisa direta (2021)

Observa-se na figura 19 que a amostra 1 lubrificada sofreu um desgaste menor comparado ao ensaio a seco. Isso é devido ao lubrificante criar uma película filme de óleo que protege a amostra do contato das partículas abrasivas, ele também diminui o atrito entre a roda de borracha e a superfície da amostra devido a suas propriedades como lubrificante. Também foi observado uma diminuição na temperatura da amostra lubrificada durante o ensaio, isso também ajudou a diminuir a severidade do desgaste pois diminuiu o coeficiente de desgaste “K” pois quanto maior é esse valor maior será a taxa de desgaste sofrida pelo material.

No geral observa-se que as propriedades do lubrificante diminuem o volume desgastado em comparação ao ensaio de desgaste a seco. A diferença identificada foi 12,26% em relação ao corpo de prova sem lubrificação. Isso é ocasionado por excesso de partículas abrasivas em contato e movimento relativo com as partes móveis em que o lubrificante está inserido. Essa observação foi possível porque o ensaio no equipamento normatizado pela ASTM G65-16 permite simular as condições operacionais de equipamentos instalados em plantas de mineração.

Na imagem 20 é mostrado o resultado após a realização dos ensaios e a cicatriz do desgaste deixado pelo abrasivo nas amostras.

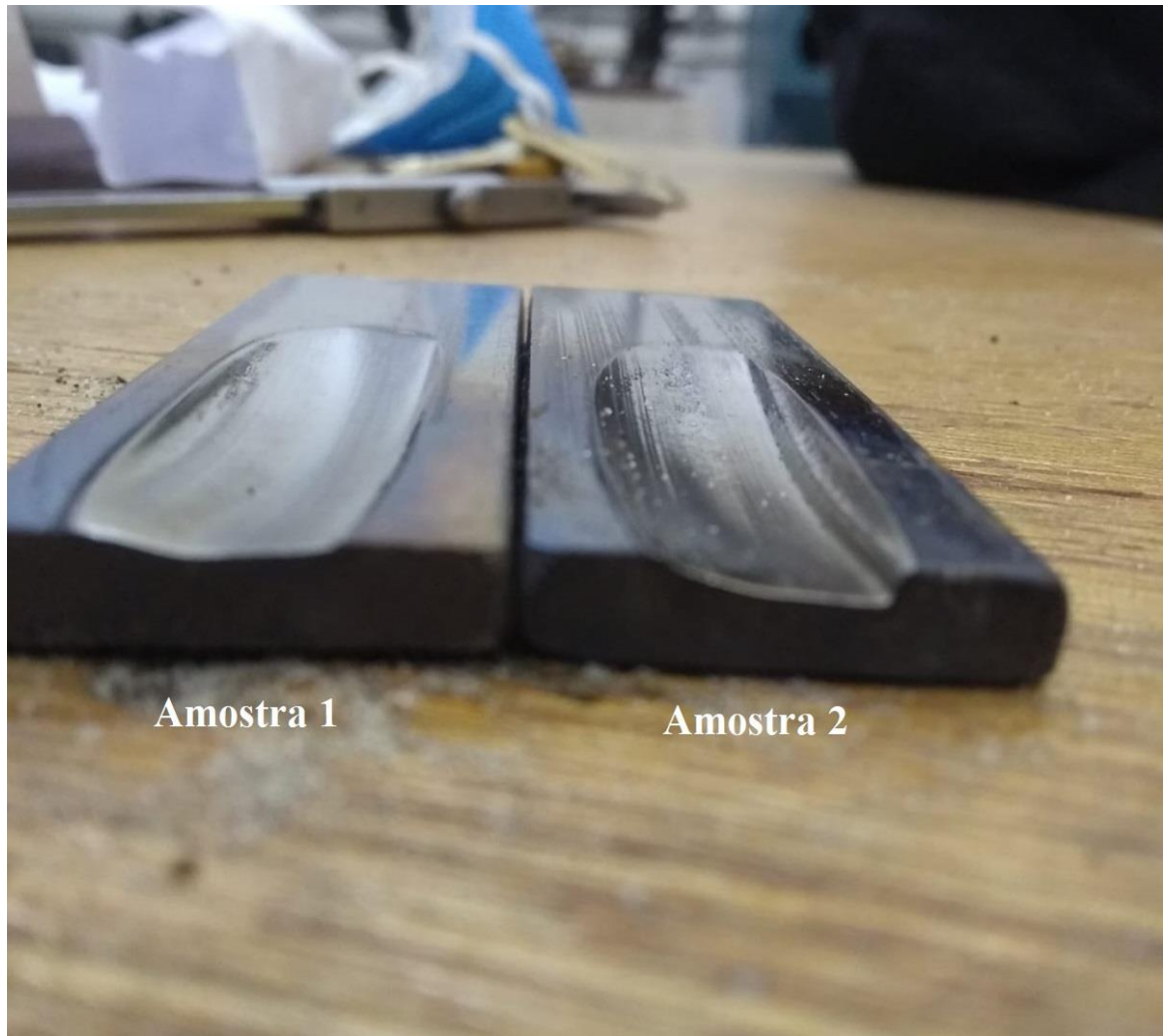


Figura 20: Cicatriz de desgaste deixado pelo abrasivo após a realização do ensaio abrasivo
Fonte: Pesquisa direta (2021)

É observado na figura 20 a diferença entre os dois ensaios, na amostra 1 a esquerda verifica-se que a profundidade foi menor devido a diminuição do atrito, as menores temperaturas durante o ensaio e um menor contato das partículas abrasivas em função da lubrificação da amostra. O lubrificante possui propriedades que gera um resfriamento durante a operação. Na amostra 2 houve um grande arrancamento de material, em função do contato direto do abrasivo no corpo de prova sem lubrificação.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 CONCLUSÕES

Neste capítulo é apresentada as conclusões referentes à pesquisa e as recomendações para trabalhos futuros relacionados ao tema estudado.

O propósito do trabalho foi estudar os fenômenos tribológicos que afetam a integridade dos equipamentos móveis que recebem lubrificação, fabricados com o aço SAE 1020 e que trabalham em ambientes contaminados por minério de ferro. A partir de ensaios de desgaste abrasivo simulados pelo equipamento normatizado pela ASTM G65-16, foi possível determinar o volume desgastado desse material pelo fenômeno de abrasão a 3 corpos e calcular a taxa de desgaste abrasivo.

A questão problema apresentada por esse trabalho introdutoriamente foi: Qual taxa de desgaste é aferida a partir da interface e movimento relativo da superfície do aço SAE 1020 com lubrificantes contaminados por minério de ferro?

Foi possível concluir que, a taxa de desgaste da amostra sem lubrificação teve um aumento de 13,96% em relação a taxa de desgaste da lubrificada que apresentou uma taxa de 0,2314 mm³/m em comparação aos 0,2637 mm³/m. Isso demonstra que a utilização do lubrificante reduz o coeficiente de desgaste de maneira significativa diminuindo a perda de material por abrasão. Entretanto, mesmo que a interface dos componentes esteja lubrificada, se houver contaminação por minério em suspensão ou particulados, haverá um desgaste severo.

As limitações encontradas para o desenvolvimento do estudo estão relacionadas com a ausência de algumas ferramentas de medição, como o paquímetro e o pirômetro. Essas limitações não permitiram a medição exata do diâmetro inicial e final da roda antes e após os ensaios e a temperatura de operação.

Pode-se concluir também a importância da gestão da lubrificação nas indústrias que possuem como matéria prima o minério de ferro, pois quanto maior a contaminação dos lubrificantes maior será a taxa de desgaste sofrida pelos materiais que estão em contato.

Pela dificuldade de extinguir a contaminação dos óleos, a manutenção preventiva dos equipamentos móveis e a análise dos óleos lubrificantes após as trocas, é de suma importância para manter a saúde das máquinas e aumentar a sua disponibilidade física e utilização.

Portanto, 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 a cerca do tema de desgaste abrasivo causado por lubrificantes contaminados.

- Utilizar de novos tipos de matérias com durezas e diferentes composições micro estruturais e químicas para se obter novos parâmetros de comparação;
- Utilizar outros tipos de lubrificantes com maior viscosidade e diferentes composições para observar a variação na resistência ao desgaste ocasionada pelas propriedades do fluido utilizado.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ALMEIDA, P. S., **Lubrificação industrial: tipos e métodos de lubrificação**. São Paulo: Érica, 2017, 184p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM G40-99: **terminology relating to wear and erosion**. Philadelphia, 1999.

ASTM G65, 2016. **Standard test method for measuring abrasion using the dry sand/rubber wheel apparatus**. Annual Book of ASTM Standards Volume 03.02, ASTM, Philadelphia, PA, pp. 247-259.

ASSIS, M. C., **Metodologia do Trabalho Científico**. Disponível em:

<<https://hugoribeiro.com.br/biblioteca-digital/Assis-Metodologia.pdf>>. Acesso em: 12/08/2021

BLAU, J. P., **Fifty years of research on the wear of metals**. Tribology International, v. 12, n. 5, 1997.

CARRETEIRO, R. P.; BELMIRO, P. N. A., **Lubrificantes & Lubrificação Industrial**. Rio de Janeiro, Interciência 2006.

CARVALHO, N., **Benefícios da gestão de fluidos**, 2015. Disponível em:

<<https://pt.slideshare.net/natanaellcarvalho/beneficios-da-microfiltragem>> Acesso em: 01 de junho de 2021.

CZICHOS, H. **Overview of Tribology**. Tribologie-Handbuch. Springer Vieweg, Wiesbaden. 28p. 2020.

ERDEMIR, A., **Genesis of superlow friction and wear in diamond like carbon films**.

Tribology International, v. 37, p. 1005-1012. 2004.

FERRANTE, F., **Estudo de viabilidade para recuperação de minério e ferro em rejeitos contidos em barragens**. 2014. 86f. Dissertação de mestrado. Departamento de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, 2014.

GIL, A. C., **Como elaborar projetos de pesquisa**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

GONÇALVES, M. M. **Tribologia: Sistema de Análise de Desgaste Abrasivo**. 2017. Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Ouro Preto.

- GREGOLIN, J. A. R., **Desenvolvimento de ligas Fe-C-Cr-(Nb) Resistentes ao Desgaste**. Tese de doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1990.
- HUTCHINGS, I. M. **Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials**. Cambridge: Butterworth-Heinemann, 1992.
- LACERDA, G.R., SILVA, V.A.D., **Monitoramento de graxas lubrificantes em condições críticas de temperatura**. Artigo científico. Universidade Federal de São João Del Rei. IX COEN – Congresso de Engenharias da UFSJ. 15f. 2019.
- MARU, M. M., **Estudo do desgaste e atrito de um par metálico sob deslizamento lubrificado**. Tese de doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 254p. 2003.
- NEALE, M. J. **Lubrication and reliability handbook**. Butterworth Heinemann, England, 2001.
- PERSSE, B.N.J., **Sliding Friction - Physical principles and application, Nanoscience and Technology**. Springer, German, 462p., 1998
- PESKOE-YANG. L., **Extending the service life of engine oils**. TLT Lubrication Fundamentals. 2020.
- QUEIJO, J. P. P., **Lubrificação de equipamentos: plano de manutenção preventiva numa indústria de mobiliário**. Dissertação de mestrado. Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, Porto, 2017.
- RABINOWICZ, E. **Friction and Wear of Materials**. Second Edition. John Wiley e Sons, United States.1995.
- RADI, P. A., **Estudos de Fenômenos Tribológicos em Materiais Carbonosos**. Tese de mestrado. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São José dos Campos, 148f. 2008.
- RAY GARVEN., **How machinery wear rates impact maintenance priorities**. 2020. Disponível em: <<https://www.machinerylubrication.com/Read/468/wear-rate-maintenance>> acesso em: 24/06/2021.
- RENSELAR, J. V., **Avoiding lubricant contamination**. Tribology & Lubrication Technology – TLT. Stle Publication. 92p. 2021.
- SANTOS, M. B., **Identificação da força de atrito através de análise de sinais não lineares em ensaios tribológicos**. Tese de doutorado. Universidade Federal de Uberlândia. 242f. 2005.

SUZUKI, R. S. **Projeto e construção de um equipamento de ensaio de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa livre**. São Bernardo Do Campo, SP. 2013. Projeto de pesquisa. Centro universitário da FEI, 2013.

SCHUITEK, A. J., **Estudo do comportamento de desgaste de materiais metálicos em riscamento circular**. Tese de doutorado. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

STOETERAU. R. L., **Tribologia - EMC 5315**. Universidade Federal De Santa Catarina, 2004.

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

ZUM-GAHR, K.H., 1987, “**Microstructure and Wear of Materials**”, Tribology Series, 10, Elsevier, pp. 1-6.

ANEXO