



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



VITOR FONSECA RAMOS

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA LIMPEZA E LUBRIFICAÇÃO NO
COEFICIENTE DE ATRITO DE DISCOS DE EMBREAGEM**

OURO PRETO - MG
2019

VITOR FONSECA RAMOS

vframes15@hotmail.com

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA LIMPEZA E LUBRIFICAÇÃO NO
COEFICIENTE DE ATRITO DE DISCOS DE EMBREAGEM**

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: MSc. Sávio Sade Tayer

**OURO PRETO – MG
2019**

R175e Ramos, Vitor Fonseca.
Estudo da Influência da Limpeza e Lubrificação no Coeficiente de Atrito de Discos de Embreagem [manuscrito] / Vitor Fonseca Ramos. - 2019.

viii,56f.: il.: color; grafs; tabs.

Orientador: Prof. MSc. Sávio Sade Tayer.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Coeficiente de atrito. 2. Discos de Embreagem. 3. Desgaste. I. Tayer, Sávio Sade. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 621



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ATA DA DEFESA

Aos 10 dias do mês de julho de 2019, às 17h, na sala 18, localizada na Escola de Minas – Campus - UFOP, foi realizada a defesa de Monografia do aluno **Vítor Fonseca Ramos**, sendo a comissão examinadora constituída pelos professores: Prof. DSc. Luis Antônio Bortolaia, Prof. MSc. Sávio Sade Tayer, Prof. Elisangela Martins Leal. O candidato apresentou o trabalho intitulado: **“Estudo da influência da limpeza e lubrificação no coeficiente de atrito de discos de embreagem”**, sob orientação do Prof. MSc Sávio Sade Tayer. Após as observações dos avaliadores, em comum acordo os presentes consideram o(a) aluno(a) aprovado

Ouro Preto, 10 de Julho de 2019.

Prof. MSc. Sávio Sade Tayer
Professor Orientador

Prof. DSc Luis Antônio Bortolaia
Professor Avaliador

Prof. Elisangela Martins Leal
Professor Avaliador

Vítor Fonseca Ramos
Aluno

A meus pais, Josias e Mônica pelo a
amor, apoio e dedicação incondicional.

A minha família por estar sempre
presente.

Aos amigos que fiz durante essa jornada.

AGRADECIMENTO

Primeiramente a minha mãe Mônica, meu pai Josias e meus irmãos Henrique e Patrícia. Ao meu orientador Sávio Sade Tayer, pelo incentivo e orientação neste trabalho. Aos professores do curso de engenharia mecânica por suas importantes contribuições para o aprimoramento do trabalho, em especial Elisângela, Bortolaia e Gustavo. A UFOP e a Escola de Minas pela assistência e oportunidade.

“Talvez não tenhamos conseguido fazer o melhor. Mas lutamos para que o melhor fosse feito. Não somos o que deveríamos ser, não somos o que iremos ser, mas graças a Deus não somos o que éramos”.

Martin Luther King

RESUMO

RAMOS, Vitor Fonseca. Estudo da Influência da Limpeza e Lubrificação no Coeficiente de Atrito de Discos de Embreagem. Este trabalho tem como objetivo, realizar um estudo sobre atrito em discos de embreagem, com intuito de coletar informações para a criação de uma base de dados para cálculos futuros e comparação entre resultados experimentais e computacionais. Para isso, foram realizadas pesquisas bibliográficas sobre tribologia, atrito, desgaste, lubrificação e sobre os próprios discos de embreagem. A metodologia tem caráter quantitativo, exploratório e bibliográfico. Foram realizados ensaios para quantificar o valor do coeficiente de atrito dos discos de embreagem. Como variáveis foram consideradas a limpeza prévia do corpo de prova, o fato do corpo de prova ser novo ou já ter sido previamente utilizado e sua lubrificação. Após a realização dos ensaios e da coleta de dados, gráficos foram montados com objetivo de comparar os resultados obtidos a partir dos ensaios com foco nos diferentes modelos de corpos de prova utilizados e nas variáveis envolvidas. Nos resultados observou-se a pouca influência na diferença dos modelos de disco de embreagem utilizados, e a pouca influência no fato de terem sido previamente utilizados ou não. As variáveis que se mostraram mais significativas na alteração do coeficiente de fricção foram a limpeza e a lubrificação. Devido ao grande espaço amostral da pesquisa, os resultados obtidos foram considerados confiáveis. Pois durante a pesquisa foram utilizadas ferramentas estatísticas como desvio padrão e intervalo de confiança.

Palavras-chave: tribologia, coeficiente de atrito, disco de embreagem, desgaste, lubrificação.

ABSTRACT

RAMOS, Vitor Fonseca. Study of the influence of cleaning and lubrication in the coefficient of freewheel clutch. This work aims to perform a study on clutch disc friction in order to collect information for the creation of a database for future calculations and comparison between experimental and computational results. For this, bibliographical research was done on tribology, friction, wear, lubrication and on the clutch discs themselves. The methodology is quantitative, exploratory and bibliographic. Tests were carried out to quantify the value of the friction coefficient of the clutch discs. As variables were considered the previous cleaning of the body of evidence, the fact that the body of evidence is new or has previously been previously used its lubrication. After performing the tests and data collection, graphs were assembled with the objective of comparing the results obtained from the tests with focus on the different models of test pieces used and on the variables involved. The results showed little influence on the difference of the clutch disc models used, and also a little influence on whether they were previously used or not. The variables that showed the most significant changes in the coefficient of friction were cleaning and lubrication. Due to the large sample space of the research, the results obtained were considered reliable.

Keywords: friction, wear, clutch.

LISTA DE SIMBOLOS

μ - Coeficiente de fricção

F – Força de atrito (N)

W – Força Normal (N)

R – Raio do cilindro em questão (m)

θ – Ângulo de rolamento. (graus)

x - Coeficiente de resistência de rolamento (m)

F_s – Força de atrito estático (N)

μ_s – Coeficiente de atrito estático

P - Soma das cargas aplicadas e da força adesiva normal na interface (Pa)

τ_m - Tensão de cisalhamento do material menos resistente (Pa)

A – Área de contato (m²)

σ – Desvio Padrão

x – Valor individual

$\bar{x}$ – Média dos valores

n – Número de valores

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Objetivos práticos da Tribologia	Erro! Indicador não definido.
Figura 2 - A força de atrito, F , necessária para causar movimento por rolamento ou deslizamento.	8
Figura 3 - Análise simplificada das forças de atrito de rolamento.	10
Figura 4 - A Força de atrito F e a Força normal L para atrito de deslizamento	12
Figura 5 - A Força de atrito de deslizamento constante F em $v = 10\mu\text{m/s}$ como uma função da carga $L = Mg$ para uma interface papel-papel.	13
Figura 6 - Um bloco sólido sobre um plano inclinado.	14
Figura 7 - Processo de transferência de metal por adesão	16
Figura 8 - Mecanismos de desgaste abrasivo: microcorte, fratura, fadiga e retirada de grãos.	18
Figura 9 - Possíveis mecanismos de erosão.....	20
Figura 10 - Mecanismo de desgaste por cavitação: a) mecanismo de colapso da bolha e b) evidência experimental de dano por cavitação a uma superfície metálica (índio).	22
Figura 11 - Modelos de interação entre um agente corrosivo e uma superfície desgastada.....	24
Figura 12 - Níveis de tensão em uma superfície deformada.	26
Figura 13 - Embreagem e volante.....	29
Figura 14 - Um conjunto de embreagem	32
Figura 15 - Organograma dos experimentos.	34
Figura 16 - Disco AA30	35
Figura 17 - Disco FXM51-25	35
Figura 18 - Visão mais próxima de onde os discos são posicionados.	36
Figura 19 - Modo como o disco é posicionado.	36
Figura 20 - Dispositivo usado no experimento.....	Erro! Indicador não definido.
Figura 21 - Gráfico exemplo.	37
Figura 22 - Experimento 1, AA30 – limpo – 1.....	41
Figura 23 - Experimento 2, AA30 – não tratado – 1	41

Figura 24 - Experimento 3, AA30 – limpo – 3.....	42
Figura 25 - Experimento 4, AA30 – não tratado – 3	42
Figura 26 - AA30 – limpo, comparação	43
Figura 27 - AA30 – não tratado, comparação	43
Figura 28 - AA30, comparação geral	44
Figura 29 - Experimento 5, FXM51-25 – limpo – 1	44
Figura 30 - Experimento 6, FXM51-25 – não tratado – 1	45
Figura 31 - Experimento 7, FXM51-25 – limpo – 2	45
Figura 32 - Experimento 8, FXM51-25 – não tratado – 2	46
Figura 33 - FXM51-25 – limpo, comparação.....	47
Figura 34 - FXM51-25 – não tratado, comparação	47
Figura 35 - FXM51-25, comparação geral	48
Figura 36 - Experimento 9. FXM51-25 – não tratado – lubrificado – 2	48
Figura 37 - Desgastes no disco 1:.....	49
Figura 38 - Desgastes no disco 2:.....	49
Figura 39 - Desgaste nos colchetes.....	50
Figura 40 - Comparação dos valores do coeficiente de fricção médio de todos os experimentos.	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Variáveis e Indicadores do trabalho	35
Tabela 2 - Resultados dos experimentos	40

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Formulação do Problema.....	1
1.2	Justificativa.....	4
1.3	Objetivos.....	5
1.3.1	Geral	5
1.3.2	Específicos.....	5
1.4	Estrutura do Trabalho	6
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1	Tribologia	7
2.2	Atrito.....	8
2.2.1	Leis do atrito	9
2.2.2	Tipos de Atrito.....	9
2.3	Desgaste.....	14
2.3.1	Tipos de Desgaste.....	15
2.4	Lubrificação.....	27
2.5	Disco de Embreagem.....	28
3	METODOLOGIA.....	33
3.1	Tipo de Pesquisa.....	33
3.2	Materiais e Métodos	34
3.3	Variáveis e Indicadores	35
3.4	Instrumentos de coleta de dados.....	35
3.5	Tabulação dos dados.....	38
4	RESULTADOS	39
4.1	Seleção dos corpos prova	Erro! Indicador não definido.
4.2	Testes realizados.....	Erro! Indicador não definido.
4.3	Cálculo e análise gráfica.....	39
4.4	Considerações Finais	50
5	CONCLUSÃO.....	52
	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	53
	ANEXO.....	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Formulação do Problema

Tribologia é o campo da ciência e tecnologia que lida com superfícies em contato e em movimento relativo – o que significa que lida com fenômenos relacionados à fricção, desgaste e lubrificação (HOLMBERG, 2009).

O termo tribologia, que vem do grego Τριβο (Tribo - esfregar) e Λογος (Logos - estudo) foi utilizado, oficialmente, pela primeira vez em 1966 em um relatório feito por H. Peter Jost para o comitê do departamento inglês de educação e ciência. Neste relatório, o termo foi definido como a “ciência e tecnologia de superfícies interativas em movimento relativo e dos assuntos e práticas relacionados” (JOST, 1990).

A Tribologia, de uma forma tradicional, existe desde o início da história registrada. Há vários exemplos bem documentados de quão cedo civilizações desenvolveram rolamentos e superfícies de baixa fricção. O estudo científico da tribologia também tem uma longa história, e muitas das leis básicas de fricção, como a da proporcionalidade entre a força normal e a força de atrito, tem o desenvolvimento atribuído a Leonardo da Vinci no final do século 15 (STACHOWIAK, 2014).

A Tribologia teve um papel central desde o início da evolução tecnológica, mesmo em tempos antigos. Reduzindo a fricção por meio do uso da roda possibilitou a humanidade se mover para mais longe e mais rápido, e a lubrificação de trenós tornou possível o transporte de blocos de construção e o erguimento de grandes estruturas. Reunindo um bom conhecimento de engenharia tribológica, metal como material de construção e óleo como lubrificante eventualmente se abriu o caminho para a revolução industrial moderna, e permitiu novas invenções como rolamentos de alta resistência e baixo atrito e engrenagens que são componentes chave em maquinários de alta potência, como descrito por Dowson (1998), Ludema (2001) e Holmberg (2004).

A força conhecida como atrito pode ser definida como a resistência encontrada por um corpo se movendo sobre outro. Essa ampla definição engloba duas importantes classes de movimentos relativos: deslizamento e rolamento. A distinção entre atrito de deslizamento e rolamento é útil, mas os dois não são mutuamente excludentes, e até mesmo o rolamento aparentemente “puro” quase sempre envolve algum deslizamento (HUTCHINGS, 1992).

Nas sociedades industrializadas modernas, há uma crescente necessidade de redução ou controle de atrito e desgaste por várias razões, por exemplo para estender a vida útil dos mecanismos e bio-sistemas, fazer motores e dispositivos mais eficientes, desenvolver novos e mais avançados produtos, conservar recursos materiais escassos, economizar energia e aumentar a segurança (HOLMBERG, 2009).

Hutchings (1992) ainda reitera que em muitos casos, um baixo atrito é desejável. Uma operação satisfatória de articulações, por exemplo, seja em dobradiças de portas ou em articulações humanas, demandam uma baixa força de atrito. Trabalho feito sob altos índices de atrito em rolamentos e outros componentes mecânicos de máquinas é dissipado como calor, e sua redução irá levar a um aumento de eficiência. Mas baixo atrito não é necessariamente benéfico em todos os casos. Em freios e embreagens, atrito é essencial; alto atrito é similarmente desejável entre o pneu de um veículo e a superfície da estrada, assim como entre o sapato e o chão para se caminhar.

Onde quer que superfícies se movam uma contra a outra, o desgaste vai ocorrer, dano a uma ou ambas as superfícies, geralmente envolvendo perda progressiva de material. Na maioria dos casos, desgaste é prejudicial, levando a folgas cada vez maiores entre os componentes em movimento, liberdade de movimento indesejada e perda de precisão, frequentemente vibração, aumento da carga mecânica e assim desgaste ainda mais rápido, e as vezes falha por fadiga. A perda por desgaste de porções relativamente pequenas de material pode ser o suficiente para a falha completa de máquinas grandes e complexas. Mas assim como no caso da fricção, às vezes, grandes taxas de desgaste podem ser desejáveis; esmerilhamento e polimento, por exemplo, aplicam processos de desgaste para remover material rapidamente e de forma controlada (HUTCHINGS, 1992).

Desgaste é a maior causa de desperdício de material e perda de desempenho mecânico e qualquer redução de desgaste pode resultar em consideráveis economias. Atrito é a principal causa de desgaste, e de dissipação de energia e economia pode ser feita melhorando o controle de fricção. É estimado que um terço dos recursos energéticos utilizados atualmente é necessário para superar o atrito de uma forma ou de outra. Lubrificação é um meio efetivo de controlar desgaste e reduzir atrito. Tribologia é o campo da ciência que aplica uma análise operacional a problemas de grande importância econômica como confiabilidade, manutenção e desgaste de equipamentos técnicos abrangendo desde aplicações domésticas até operações espaciais (STACHOWIAK, 2014).

No campo da mecânica automotiva, um dos componentes que mais sofrem com o atrito e o desgaste são os discos de embreagem.

Os discos de embreagem são um mecanismo para transmissão de rotação. Discos de embreagem são úteis em dispositivos que possuem dois eixos rotativos. Nesses dispositivos, um eixo é tipicamente impulsionado por um motor ou polia, e o outro eixo impulsiona outro dispositivo. Dependendo da orientação, velocidade, material, torque produzido e finalmente o uso de todo o dispositivo, diferentes tipos de embreagem são usados. O próprio disco de embreagem em si é um mecanismo, que aplica diferentes configurações e diferentes princípios em vários modelos disponíveis (SALEH, 2017).

A embreagem de fricção é um importante componente de qualquer máquina automotiva. É uma ligação entre o motor e o sistema de transmissão que conduz energia, em forma de torque, do motor ao conjunto de engrenagens. Quando o veículo é ligado, a embreagem é acionada para transferir o torque para a transmissão; e quando o veículo está em movimento a embreagem é primeiro desengatada para permitir a seleção de marchas, e então, novamente engatada suavemente para movimentar o veículo (SALEH, 2017).

Um método para se reduzir o atrito, e frequentemente o desgaste, é lubrificar as superfícies de alguma forma, e o estudo da lubrificação é intimamente relacionado com o atrito e o desgaste. De fato, mesmo quando um lubrificante artificial não é adicionado ao sistema, componentes da atmosfera (especialmente oxigênio e vapor d'água) frequentemente desempenham um papel semelhante, e precisam ser considerados num estudo de interação das superfícies (HUTCHINGS, 1992).

Como explanado, há muitos fatores envolvidos quando se trata da interação entre superfícies em movimento, como o atrito que ocorre entre elas, o desgaste que esse atrito pode causar e as maneiras com que ele pode ser reduzido. Este trabalho tem como objetivo analisar o comportamento tribológico de discos de embreagem e observar como o tratamento de limpeza e lubrificação podem influenciar nesse comportamento.

Diante do exposto segue a seguinte problemática:

Como o tratamento de limpeza e lubrificação pode influenciar no coeficiente de atrito de discos de embreagem?

1.2 Justificativa

O enorme custo de deficiências tribológicas para a economia de qualquer nação é em sua maior parte causada pela grande quantidade de perda de energia e material ocorrendo simultaneamente em virtualmente qualquer dispositivo mecânico em operação. Quando se toma como base uma única máquina, as perdas são pequenas. Entretanto, quando a mesma perda é repetida em talvez milhões de máquinas de um tipo semelhante, então os custos se tornam enormes (STACHOWIAK, 2014).

Jost (1996) foi o primeiro a estudar os impactos econômicos devido à utilização dos conhecimentos de tribologia. Este estudo é considerado o marco de criação da tribologia. As estimativas de reduções de gastos apresentadas no relatório de Jost são de que mediante o uso do conhecimento existente podem-se reduzir as perdas por desgaste em 20%. O aspecto ambiental também é muito importante na análise global das perdas por desgaste. As maiores perdas no motor de um automóvel (por exemplo), transitando em uma cidade, são devidas ao resfriamento e à exaustão. Apenas 12% da potência do motor são transmitidas às rodas, o que é menor do que as perdas por atrito (cerca de 15%). Considerando melhorias de 20% a economia seria de 300 milhões de reais por ano e uma redução de 37.500 toneladas de CO₂ emitidos para atmosfera, apenas na cidade de São Paulo (ANDERSON, 1991).

Ludema (1996) cita que as consequências, da fricção e do desgaste são muitas, e as divide arbitrariamente em cinco categorias, que não são nem mutuamente exclusivas e nem totalmente inclusivas:

- *Fricção e desgaste geralmente custam dinheiro*, na forma de energia e material perdido, assim como no uso sistêmico de dispositivos mecânicos.
- *Fricção e desgaste podem diminuir a produtividade nacional*. Isso pode ocorrer de diversas formas, como por exemplo se um produto nacional se desgasta rapidamente, haverá uma tendência pela opção de produtos importados, diminuindo assim a produção nacional.
- *Fricção e desgaste podem afetar a segurança nacional*. O decréscimo da eficiência de equipamentos militares afeta diretamente a performance de missões militares.
- *Fricção e desgaste podem afetar a qualidade de vida*. Próteses dentárias, juntas esqueléticas artificiais e válvulas cardíacas artificiais melhoram a qualidade de

vida quando essas partes naturais se deterioram. O desgaste dos substitutos artificiais afetaria a qualidade de vida de muitos.

- *Desgaste pode causar acidentes.* Acidentes de trânsito as vezes são causados por freios ou outras peças desgastadas. Fiações desgastadas expõem as pessoas a risco de choque elétrico. Cabos desgastados se rompem, etc.

Stachowiak (2014) ainda reitera que assim que a extensão da perda econômica devido a fricção e desgaste se tornou clara, pesquisadores e engenheiros rejeitaram muitas das limitações de desempenho mecânico tradicional e encontraram, ou estão procurando por novos materiais e lubrificantes para superar esses limites. Algumas dessas melhorias previstas são tão radicais que podem mudar toda a tecnologia e economia do produto.

Como visto, o atrito, e por consequência o desgaste, está presente em todas as esferas da vida e da indústria. E seu excesso pode causar diversos tipos de consequências indesejadas. Este estudo visa se aprofundar no comportamento do atrito especificamente nos discos de embreagem, que é um componente vital para toda a indústria automotiva.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Estudar experimentalmente influência da limpeza e lubrificação no coeficiente de atrito de discos de embreagem.

1.3.2 Específicos

- Realizar o estudo teórico sobre os assuntos que envolvem tribologia, tais como: atrito, desgaste e lubrificação.
- Buscar estudos que relacionem as áreas tribologia especificamente à embreagem automotiva.
- Realizar análise experimental de testes de fricção em discos de embreagem.
- Comparar os resultados obtidos nos ensaios práticos analisando as diferentes variáveis envolvidas.

1.4 Estrutura do Trabalho

O primeiro capítulo diz respeito à formulação do problema que será estudado, desenvolvido e solucionado no decorrer do conteúdo deste trabalho, além de apresentar a justificativa para a elaboração do trabalho, os objetivos gerais e específicos.

O segundo capítulo será composto pela revisão bibliográfica sobre tribologia, atrito, fricção, desgaste e lubrificação.

No terceiro capítulo é apresentado qual foi a metodologia utilizada para o desenvolvimento da pesquisa realizada, mostrando também as ferramentas necessárias para a elaboração da mesma.

No quarto capítulo são mostrados os resultados e discussões a partir dos dados obtidos e também do embasamento teórico realizado no segundo capítulo.

Por fim, no quinto capítulo o trabalho será finalizado apresentando as conclusões chegadas e apresentando possíveis sugestões para trabalhos e pesquisas futuras.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será apresentado o aporte técnico utilizado no trabalho de forma a embasar e validar os processos e procedimentos utilizados para a realização deste estudo aqui proposto.

2.1 Tribologia

Com a expansão da nossa civilização tecnológica, conservação de material e energia tem se tornado cada vez mais importantes. Desgaste é a maior causa de desperdício de material, então qualquer redução de desgaste pode resultar em economias consideráveis. Atrito é a principal causa de dissipação de energia e pode ser significativamente reduzido se implantando controle de atrito. Lubrificação é o meio mais efetivo de controle de desgaste e redução de atrito. Portanto tribologia, que é a ciência e tecnologia de atrito lubrificação e desgaste, é de grande importância na conservação de material e energia (SCOOT, 1991).

A figura 1 apresenta os aspectos fundamentais da tribologia:

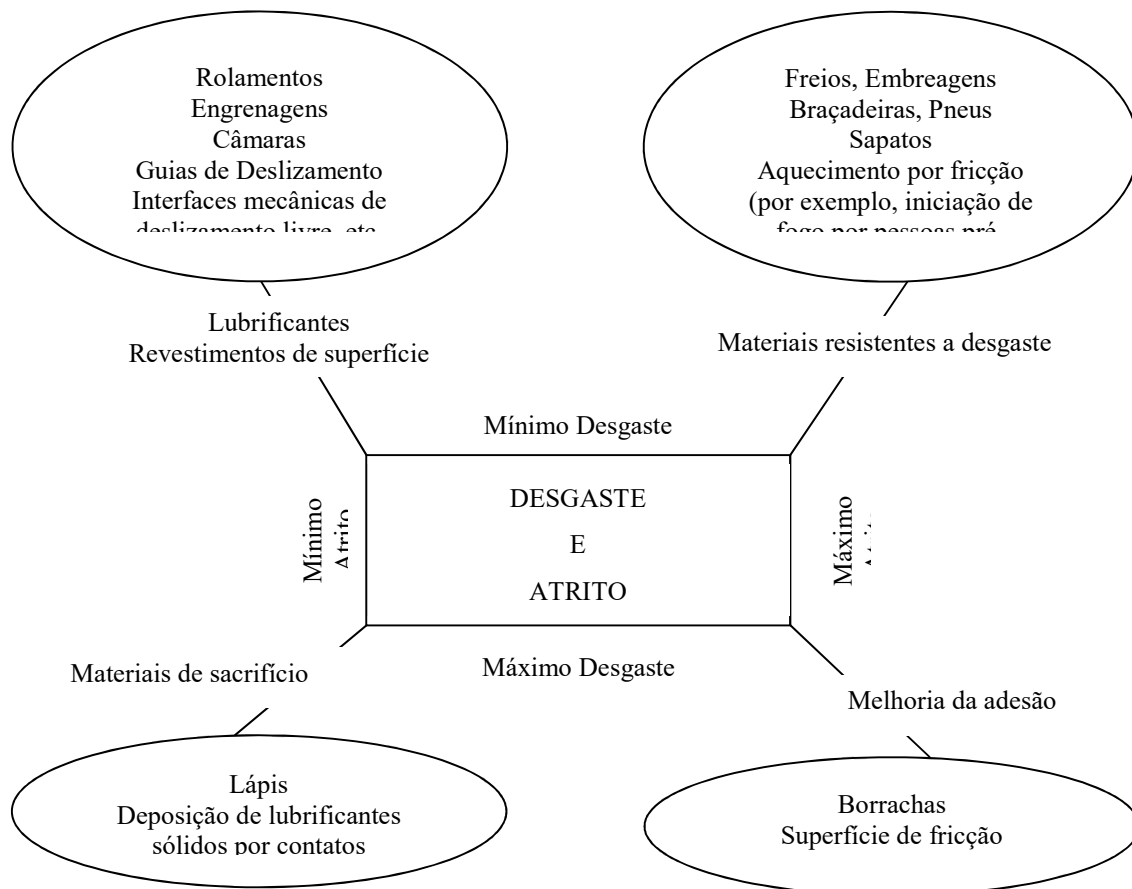


Figura 1: Objetivos Práticos da Tribologia.
Fonte: [Adaptado de (STACHOWIAK, 2014)]

Como dito por Scoot (1991), e apresentado por Stachowiak (2014) no fluxograma acima, os pilares da tribologia são o atrito, o desgaste e a lubrificação. E estes serão os próximos assuntos abordados neste trabalho.

2.2 Atrito

Atrito é um fenômeno extraordinário. Tão sutil como o atrito é nas experiências cotidianas, ainda há muito o que aprender sobre sua natureza, como muda sob diferentes circunstâncias, e como pode ser previsto e controlado. Seus efeitos sobre o comportamento de máquinas e materiais tem sido objeto de estudo e contemplação por centenas e até milhares de anos, voltando no tempo pelo menos tanto quanto Aristóteles (384-322 AC). De fato, pode se concordar que o primeiro uso não documentado de um tronco ou de uma pedra arredondada para mover um objeto pesado foi a solução de engenharia para um problema pré-histórico de atrito (BLAU, 2009).

A força conhecida como atrito pode ser definida como a resistência encontrada por um corpo para mover outro. Essa ampla definição encobre duas importantes classes de movimento relativo: deslizamento e rolamento. A distinção entre atrito de rolamento e deslizamento é útil, mas os dois não são mutuamente excludentes, e mesmo rolamento aparentemente “puro” quase sempre envolve algum deslizamento (HUTCHINGS, 1992)

Idealmente, tanto para rolamento quanto para deslizamento, como mostrado na figura 2, uma força tangencial F é necessária para mover o corpo sobre a contraface estacionária.

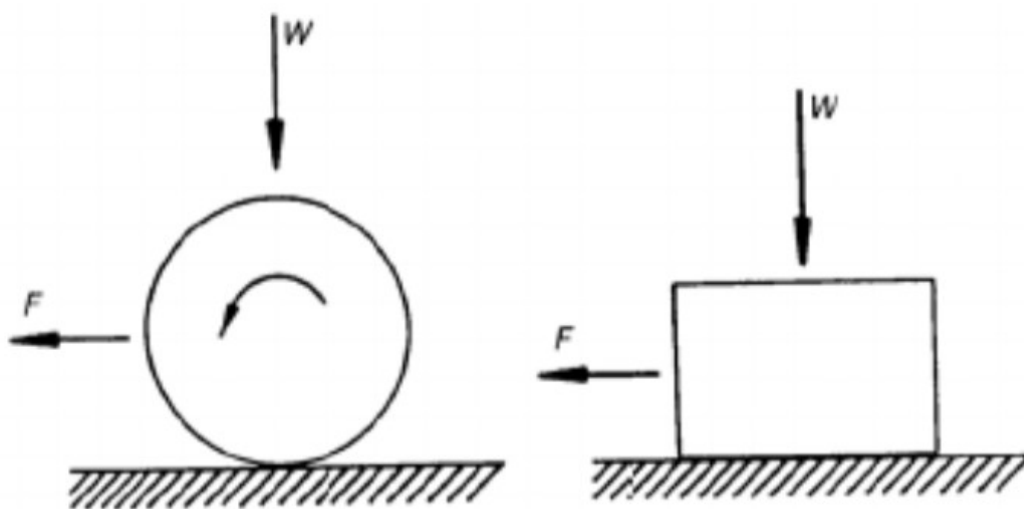


Figura 1 - A força de atrito, F , necessária para causar movimento por rolamento ou deslizamento.
Fonte: Hutchings 1992

A razão entre essa força de atrito e a força normal W é conhecida como coeficiente de fricção, e é usualmente denotada pelo símbolo μ , na equação 1:

$$\mu = F/W \quad (1)$$

A magnitude da força de atrito é convenientemente descrita como o valor do coeficiente de fricção, que pode variar sobre uma ampla gama de valores: de cerca de 0,001 em um rolamento levemente carregado até maior que 10 para metais limpos deslizando sobre si mesmos no vácuo. Para os materiais mais comuns deslizando no ar, entretanto, o valor de μ fica em uma gama mais estreita de valores mais ou menos entre 0,1 e 1 (HUTCHINGS, 1992).

2.2.1 Leis do atrito

Sob algumas condições de deslizamento, μ para um determinado par de materiais e condições fixas (ou ausência) de lubrificação pode ser quase constante. Essas observações levaram à formulação de duas leis empíricas de atrito de deslizamento, frequentemente atribuída a Amontons que as redescobriu em 1699; Leonardo da Vinci, entretanto, foi o primeiro a descrevê-las cerca de 200 anos antes. As Leis do Atrito podem ser declaradas como se segue:

- I. a força de atrito é proporcional à força normal; e
- II. a força de atrito é independente da área de contato aparente.

Para esta as vezes é adicionada uma terceira lei, frequentemente atribuída a Coulomb, 1785:

- III. a força de atrito independe da velocidade de deslizamento.

Estas três Leis do Atrito são de confiança variável, mas exceto por alguns casos importantes elas fornecem resumos uteis de observações empíricas (HUTCHINGS, 1992).

2.2.2 Tipos de Atrito

2.2.2.1 Atrito de Rolamento

Atrito durante o rolamento é importante para aplicações como a performance de discos de rolamento e a laminação de produtos laminados. Se um cilindro de raio R rola sobre uma base estacionária de tal forma que quando rola em um ângulo ψ o eixo do cilindro é deslocado em relação a base por uma distância igual a $R\psi$, então é dito que houve rolamento puro. No rolamento puro, o ponto de contato do cilindro na base plana permanece estacionário, figura 3,

e o eixo passando por esse ponto e perpendicular ao plano da base é chamado de eixo instantâneo de rotação.

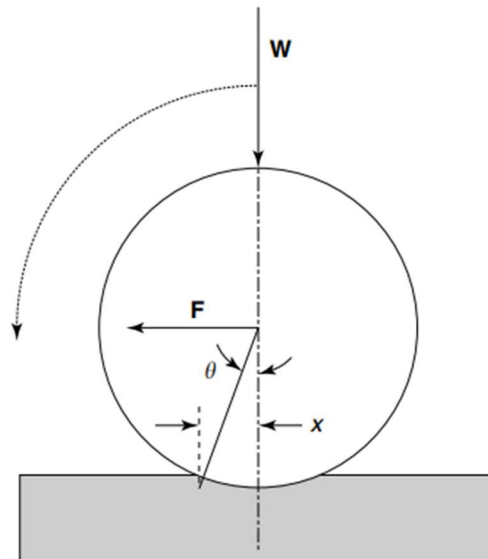


Figura 2 - Análise simplificada das forças de atrito de rolamento.
Fonte: Blau 2009.

Se o cilindro e o plano são ambos perfeitamente rígidos e não há atrito com o ar, o cilindro continua a rolar indefinidamente. Entretanto, como mostrado na figura 3, não há um único ponto de contato, mas sim uma distribuição da pressão de contato por uma ligeira crista que é desenvolvida em um local da direção do rolamento (para a esquerda no presente caso).

Uma força motriz F precisa ser aplicada para manter o movimento. A distribuição de pressão na seção curvada pode ser representada como uma resultante, força normal N , atuando em um ponto compensando uma distância x da perpendicular através do centro do cilindro. Se assumirmos equilíbrio de forças durante o movimento de rolamento contínuo, se pode somar os momentos sobre esse ponto e encontrar Wx conforme a equação 2:

$$Wx = F (R \cos \theta). \quad (2)$$

Entretanto, quando $R \gg x$, a equação acima pode ser aproximada para $Wx \sim FR$. A distância x é frequentemente definida como o coeficiente de resistência de rolamento, de acordo com a equação 3:

$$x = F/W * R \cos \theta \approx FR/W \quad (3)$$

Note que esse coeficiente não é adimensional, mas é dado em unidades de comprimento. Uma revisão da literatura sugere que não há um consenso universal sobre o símbolo do

coeficiente de resistência de rolamento. Portanto, o símbolo usado para o coeficiente de resistência de rolamento precisa ser determinado no contexto do trabalho (BLAU, 2009).

2.2.2.2 Atrito Estático

Historicamente, atrito estático foi ligado a adesão e a quebra de ligação entre átomos em superfícies opostas. Se todas as causas possíveis para o atrito devem ser consideradas justamente, é razoável indagar se existem outros meios que façam com que corpos permaneçam juntos sem o requerimento de ligação molecular. Por exemplo, uma barra metal mantém um ímã sem ligação adesiva a ele. Velcro funciona por interligação mecânica.

Superfícies podem aderir, mas aderência não é o mesmo que adesão porque não há requerimento de ligação molecular. Se um certo material é fundido entre duas superfícies e, depois de penetrar e preencher espaços regulares nas duas superfícies, solidifica de tal modo a formar uma rede de “dedos” de interligação, pode se tornar uma forte junção mecânica, mas sem adesão.

Microscópios de força atômica ganharam proeminência nas décadas finais do século XX. Eles permitiram aos investigadores estudar e mapear adesão e forças laterais entre superfícies em escala molecular. Operadores de tais instrumentos eram familiares à tendência da sonda fina de saltar para a superfície quando a distância de aproximação se tornava muito pequena. A força requerida para deslocar os dois corpos tangencialmente precisa superar qualquer ligação que estiver segurando as superfícies juntas. No caso de metais dissimilares com uma preferência de ligação forte, a força de cisalhamento das ligações interfaciais pode exceder a força de cisalhamento do mais fraco dos dois metais, e a força de atrito estático (F_s) vai depender da tensão de cisalhamento do material mais fraco (τ_m) e da área de contato (A). Em termos do coeficiente de atrito estático μ_s , pode-se encontrar F_s a partir da equação 4:

$$F_s = \mu_s P^* = \tau_m A \quad (4)$$

Ou μ_s pela equação 5:

$$\mu_s = (\tau_m A / P^*) A \quad (5)$$

onde P^* é a força normal que é a soma das cargas aplicadas e da força adesiva normal na interface. Sob condições especiais controladas, como experimentos de atrito com superfícies limpas e próximas do vácuo, o coeficiente de atrito estático pode ser muito maior do que 1.0, e

o experimento se torna mais uma medida da força de cisalhamento dos materiais sólidos do que sobre o atrito interfacial (BLAU, 2009).

2.2.2.3 Atrito de Deslizamento

Assim como o atrito estático, o atrito de deslizamento desempenhou um papel no desenvolvimento tecnológico das sociedades em evolução – desde a prática de girar um bastão manualmente sobre outro para se fazer fogo em uma caverna antiga até o desenvolvimento de rolamentos de alta velocidade para o motor principal de um ônibus espacial. Milhares de anos atrás, indivíduos ou pequenos grupos de seres primitivos teriam muito trabalho para arrastar objetos pesados sobre o solo. Mais tarde, mesmo antes das primeiras rodas, água e gordura de animal foram usados como lubrificantes em rolos feitos de troncos de árvores. Em seguida, rodas raiadas e mais suaves, rodas rígidas foram inventadas e cada vez menos força tangencial era necessária para iniciar e sustentar movimento relativo. Com a modernidade, em rolamentos bem lubrificados, o coeficiente de atrito chega a ser menor que 0,001 (BLAU, 2009).

O coeficiente de fricção μ entre dois sólidos definido como F/L onde F denota a força de atrito e L a carga ou a força normal à superfície, figura 4.

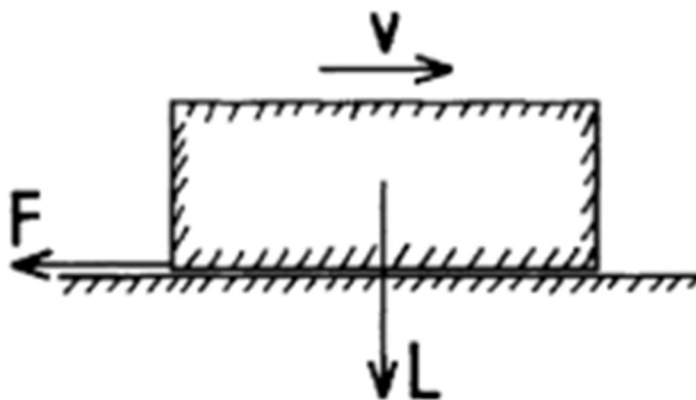


Figura 3 - A Força de atrito F e a Força normal L para atrito de deslizamento
Fonte: Persson, 2000.

Há uma lei muito simples relativa a μ que é surpreendentemente bem obedecida. Esta lei afirma que μ é independente da área de contato aparente. Isso significa que para uma mesma carga L a força de atrito será a mesma para um bloco pequeno ou para um grande. Um corolário é que μ é independente da carga ou, equivalentemente, a força de atrito é proporcional à carga, como ilustrado na figura 5 para papel em papel.

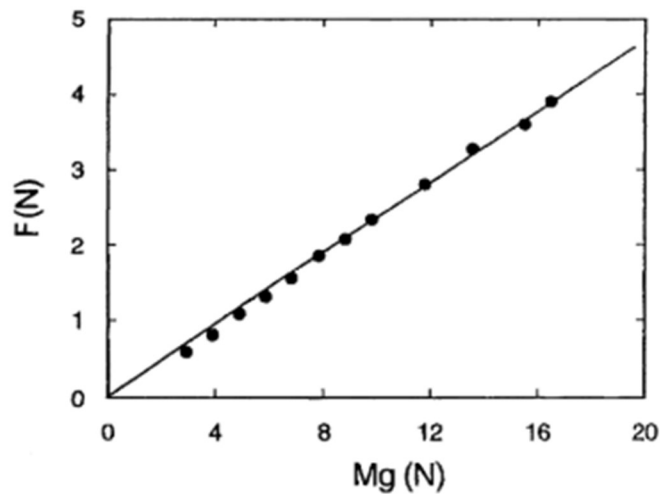


Figura 4 - A Força de atrito de deslizamento constante F em $v = 10\mu\text{m/s}$ como uma função da carga $L = Mg$ para uma interface papel-papel.

Fonte: Persson, 2000.

A explicação física para isso é que a área de real contato atômico entre dois sólidos é normalmente proporcional à carga. Uma segunda observação interessante é que o coeficiente de atrito μ é quase sempre independente da velocidade a não ser que a velocidade de deslizamento seja muito baixa, onde ativação térmica se torna importante, ou muito alta. Finalmente, ao contrário da opinião comum, para superfícies típicas de engenharia μ é quase sempre independente da rugosidade da superfície, a não ser que a superfície seja muito rugosa ou muito lisa; em ambos os casos as forças de atrito são maiores do que na região intermediária de rugosidade.

Que μ é aproximadamente independente da carga L pode ser demonstrado por um experimento simples. Define-se um plano, inclinado de um pequeno ângulo θ , e posiciona-se um bloco de peso Mg sobre esse plano, como na figura 6.

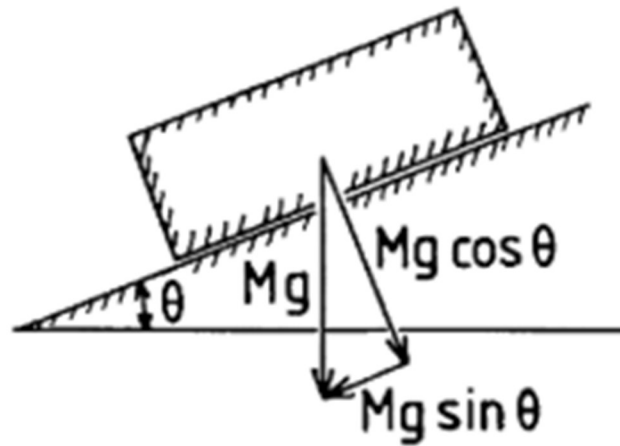


Figura 5 - Um bloco sólido sobre um plano inclinado.
Fonte: Persson, 2000.

Então inclina-se esse plano para um ângulo mais íngreme, até o bloco começar a deslizar para baixo sob o próprio peso. A componente do peso paralelo ao plano é $Mg \sin \theta$, e precisa ser igual à força de atrito F . A componente do peso normal à superfície é $L = Mg \cos \theta$. Com esses valores $\mu = F/L = \tan \theta$. Se esta lei for exata, um objeto começará a deslizar a partir de uma inclinação definida, independente do peso Mg , bem como é de fato normalmente observado (PERSSON, 2000).

2.3 Desgaste

Desgaste ocorre como uma consequência natural onde duas superfícies com movimento relativo interagem uma com a outra. Embora o entendimento de vários mecanismos de desgaste esteja aumentando atualmente, nenhuma lei quantitativa simples e confiável comparável às do atrito foram desenvolvidas. Isso não é surpreendente tendo em vista que o processo de desgaste envolve vários fenômenos diversos, interagindo de maneiras imprevisíveis grande parte das vezes. Além disso, enquanto que os coeficientes de fricção da maioria dos materiais ficam entre 0,1 e 1,0, taxas de desgaste correspondente podem variar em muitas ordens de grandeza (HALLING, 1978).

Segundo Scott (1991), desgaste pode ser definido como o indesejado deslocamento ou remoção de material superficial, apesar de que em algumas circunstâncias, os estágios iniciais de desgaste ou um desgaste suave que tende a suavizar superfícies, pode ser benéfico para o amaciamento de mecanismos. As implicações econômicas do desgaste causam preocupação na indústria, uma vez que é necessária uma vida útil razoável de equipamentos para cobrir custos de capital e manutenção. Embora, em muitos casos, o desgaste não possa impor um limite

absoluto à vida de um investimento, ele certamente causa uma grande quantidade de gastos com manutenção que devem ocorrer; tal manutenção é cara por si mesma, mas também dispendiosa em perda de produtividade enquanto está sendo realizada.

Já Halling (1978), afirma que desgaste é um conceito familiar a todos e que provavelmente a maioria julga compreender o que significa desgaste. Entretanto, a formulação de uma precisa e abrangente definição de desgaste é difícil. Um comitê do Instituto de Engenheiros Mecânicos decidiu pela seguinte definição: ‘a perda progressiva de substância da superfície de um corpo causada por ação mecânica’. Kragelskii (1965) define desgaste como: ‘a destruição de material produzida como resultado de repetidos perturbações das ligações de atrito’. Nenhuma das definições é perfeita. Por exemplo, a primeira parece eliminar a erosão por centelha como uma forma de desgaste, e a segunda talvez coloque muita ênfase nos efeitos da fadiga no desgaste.

2.3.1 Tipos de Desgaste

Visando um melhor entendimento sobre atrito, é essencial reconhecer os vários distintos e independentes mecanismos envolvidos. Burwell (1957) lista 4 mecanismos:

1. Desgaste Adesivo
2. Desgaste Abrasivo
3. Desgaste Corrosivo
4. Fadiga Superficial

Ele também inclui uma quinta classificação chamada ‘tipos menores’ de desgaste, que inclui erosão e cavitação.

2.3.1.1 Desgaste Adesivo

O desgaste adesivo é uma forma muito séria de desgaste, caracterizada por altas taxas de desgaste e um alto e instável coeficiente de fricção. Contatos deslizantes podem ser destruídos rapidamente pelo desgaste adesivo e, em casos extremos, o movimento de deslizamento pode ser evitado por coeficientes de fricção muito grandes. Metais são particularmente propensos ao desgaste adesivo, portanto, seu significado prático. A maioria das falhas de lubrificantes nos contatos deslizantes de metais resultam em desgaste adesivo, pois isso se relaciona a uma falha na função básica do lubrificante de fornecer algum grau de

separação entre as superfícies deslizantes. Se as superfícies de deslizamento não forem separadas, a adesão e o desgaste subsequente são inevitáveis (STACHOWIAK, 2014).

A maioria dos sólidos irá aderir em contato com outro sólido até certo ponto, desde que certas condições sejam satisfeitas. A adesão entre dois objetos casualmente colocados juntos não é observada porque as camadas contaminantes intervenientes de oxigênio, água e óleo estão geralmente presentes. A atmosfera terrestre e a matéria orgânica terrestre fornecem camadas de contaminantes superficiais em objetos que suprimem muito eficazmente qualquer adesão entre sólidos. A adesão também é reduzida com o aumento da rugosidade superficial ou dureza dos corpos em contato. A observação visual da adesão tornou-se possível após o desenvolvimento de altos sistemas de vácuo que permitiram a preparação de superfícies livres de contaminantes. Experimentos de adesão e deslizamento realizados sob alto vácuo mostraram um comportamento tribológico totalmente diferente de muitos materiais comuns daquele observado ao ar livre. As superfícies metálicas livres de membranas de óxido sob alto vácuo exibiram as mudanças mais dramáticas e, em parte, por essa razão, têm sido amplamente estudadas.

Além dos metais nobres como o ouro e a platina, qualquer outro metal é sempre coberto por uma película de óxido quando presente na forma não reagida, numa atmosfera oxidante. A película de óxido é tão fina que parece invisível e o metal parece brilhante e puro. Esta película, que pode ter apenas alguns nanômetros de espessura, impede o contato verdadeiro entre os metais e impede o desgaste severo, a menos que seja deliberadamente removida.

Numerosos testes em uma ampla variedade de combinações de metais mostraram que, quando há uma adesão forte, a transferência do metal mais fraco para o mais forte ocorre como ilustrado esquematicamente na figura 7.

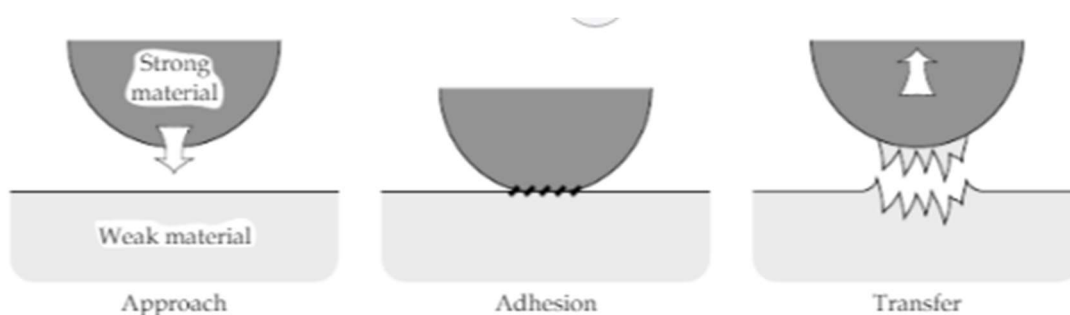


Figura 6 - Processo de transferência de metal por adesão
Fonte: Stachowiak (2014).

2.3.1.2 Desgaste Abrasivo

O desgaste por abrasão e erosão são formas de desgaste causadas pelo contato entre uma partícula e material sólido. O desgaste abrasivo é a perda de material pela passagem de partículas duras sobre uma superfície (STACHOWIAK, 2014).

O termo "desgaste abrasivo" abrange dois tipos de situação. Em ambos os casos, o desgaste é ocasionado pela retirada de material mais macio por uma superfície mais dura. No primeiro caso, uma superfície áspera desliza contra uma superfície mais macia. No segundo caso, a abrasão é causada por partículas duras soltas que deslizam entre as superfícies de atrito. A ação de uma lixa ou papel abrasivo contra um metal mais macio é um exemplo do primeiro tipo de abrasão. Há dois requisitos: uma superfície deve ser mais dura que a outra e a superfície dura deve ser áspera. Por exemplo, a taxa de desgaste do carbono contra o carboneto de tungstênio é muito baixa se a superfície do carboneto de tungstênio tiver sido suavizada o suficiente. Este tipo de desgaste foi largamente eliminado das máquinas modernas, devido a uma maior consciência da importância de acabamento superficial e a disponibilidade de instrumentos para a medição de rotina da rugosidade da superfície (HALLING, 1978).

No entanto, o segundo mecanismo ainda é de grande importância. Não só a maioria dos mecanismos funciona em um ambiente que contém muita poeira e sujeira no ar, mas também os produtos de desgaste corrosivo são, na maioria das vezes, de caráter abrasivo. Partículas de metal duro produzidas pelo mecanismo de desgaste do adesivo também podem causar abrasão. No entanto, a poeira e partículas aerotransportadas são a maior fonte de partículas abrasivas e a solução prática é excluir a poeira por meio de vedação e filtração adequadas (HALLING, 1978).

O desgaste abrasivo ocorre sempre que um objeto sólido é carregado contra partículas de um material com dureza igual ou maior. Um exemplo comum desse problema é o desgaste das máquinas de movimentação de terras. A extensão do desgaste abrasivo é muito maior do que a que pode se imaginar. Qualquer material, mesmo que a maior parte seja muito macio, pode causar desgaste abrasivo se houver partículas duras. Por exemplo, um material orgânico, como a cana-de-açúcar, está associado ao desgaste abrasivo de cortadores de cana e trituradores devido à pequena fração de sílica presente nas fibras vegetais (SHARP, 1962).

Uma dificuldade importante na prevenção e controle do desgaste abrasivo é que o termo “desgaste abrasivo” não descreve precisamente os mecanismos de desgaste envolvidos. Há, na verdade, quase sempre vários mecanismos diferentes de desgaste atuando em conjunto, todos

com características diferentes. Os mecanismos de desgaste abrasivo são descritos a seguir, seguidos de uma análise dos vários métodos de controle (STACHOWIAK, 2014).

Pensou-se originalmente que o desgaste abrasivo por grãos ou aspereza dura se assemelhava muito ao corte por uma série de máquinas-ferramentas ou uma lixa. No entanto, o exame microscópico revelou que o processo de corte é apenas aproximado pelos grãos mais afiados e muitos outros mecanismos mais diretos estão envolvidos. As partículas ou grão podem remover o material por micro-processamento, microfratura, retirada de grãos individuais (Swain, 1975) ou fadiga acelerada através de deformações repetidas, conforme ilustrado na Figura 8.

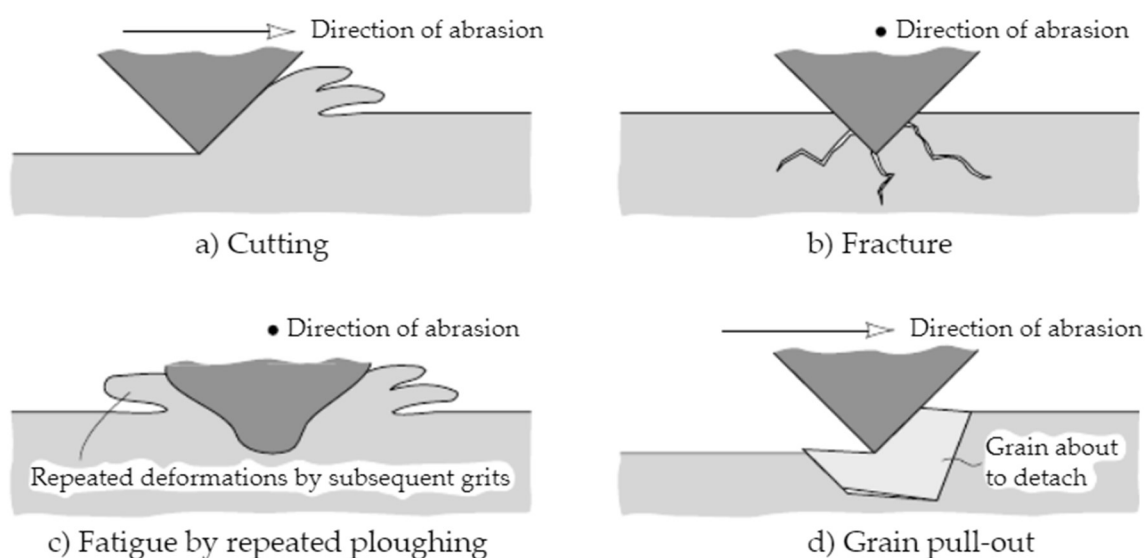


Figura 7 - Mecanismos de desgaste abrasivo: microcorte, fratura, fadiga e retirada de grãos.
Fonte: STACHOWIAK, 2014

O primeiro mecanismo ilustrado na figura 8a, corte, representa o modelo clássico em que um grão afiado ou de aspereza dura corta a superfície mais macia. O material que é cortado é removido como resíduo de desgaste. Quando o material desgastado é frágil, por exemplo, cerâmica, pode ocorrer fratura da superfície desgastada, figura 8b. Neste caso, os detritos de desgaste são o resultado da convergência de fendas. Quando um material dúctil é desgastado por um cascalho, o corte é improvável e a superfície gasta é deformada repetidamente, figura 8c. Neste caso, o desgaste de detritos é o resultado da fadiga do metal. O mecanismo ilustrado, figura 8d representa o descolamento de grãos ou a retirada de grãos. Este mecanismo aplica-se principalmente às cerâmicas onde o limite entre os grãos é relativamente fraco. Nesse mecanismo, todo o grão é perdido como resíduos de desgaste (STACHOWIAK, 2014)

2.3.1.3 Desgaste Erosivo

O desgaste erosivo é causado pelo impacto de partículas sólidas ou líquidas contra a superfície de um objeto. O desgaste erosivo ocorre em uma ampla variedade de máquinas e exemplos típicos são os danos às pás das turbinas a gás quando uma aeronave voa através das nuvens de poeira e o desgaste dos impulsores da bomba nos sistemas de processamento de polpa mineral. Em comum com outras formas de desgaste, a resistência mecânica não garante resistência ao desgaste e um estudo detalhado das características do material é necessário para a minimização do desgaste. As propriedades da partícula em erosão também são significativas e estão sendo cada vez mais reconhecidas como um parâmetro relevante no controle desse tipo de desgaste (STACHOWIAK, 2014).

O termo erosão é geralmente usado para cobrir a forma de dano sofrida por um corpo sólido, quando um fluido, que pode conter partículas sólidas, colide com a superfície do corpo. Até muito recentemente, a erosão tem sido considerada uma pequena fonte de desgaste, e muitas revisões de desgaste referem-se a ela apenas brevemente, se é que são. No entanto, com o contínuo desenvolvimento de mecanismos que operam em alta velocidade, juntamente com a necessidade de materiais com altas taxas de resistência à densidade, a erosão ganhou mais destaque. Isso é exemplificado pelas lâminas de turbina de plástico reforçado com fibra de carbono, cujas bordas de ataque exigem revestimentos especiais para aumentar a resistência à erosão (HALLING, 1978).

O desgaste erosivo envolve vários mecanismos de desgaste que são amplamente controlados pelo material particulado, pelo ângulo de impacto, pela velocidade de impacto e pelo tamanho da partícula. Se a partícula é dura e sólida, então é possível que ocorra um processo semelhante ao desgaste abrasivo. As partículas líquidas são o erodente, a abrasão não ocorre e os mecanismos de desgaste envolvidos são o resultado de tensões repetitivas no impacto.

O termo “desgaste erosivo” refere-se a um número não especificado de mecanismos de desgaste que ocorrem quando partículas relativamente pequenas impactam contra componentes mecânicos. Essa definição é empírica por natureza e se relaciona mais com considerações práticas do que com qualquer compreensão fundamental do desgaste. Os mecanismos conhecidos de desgaste erosivo são ilustrados na figura 9.

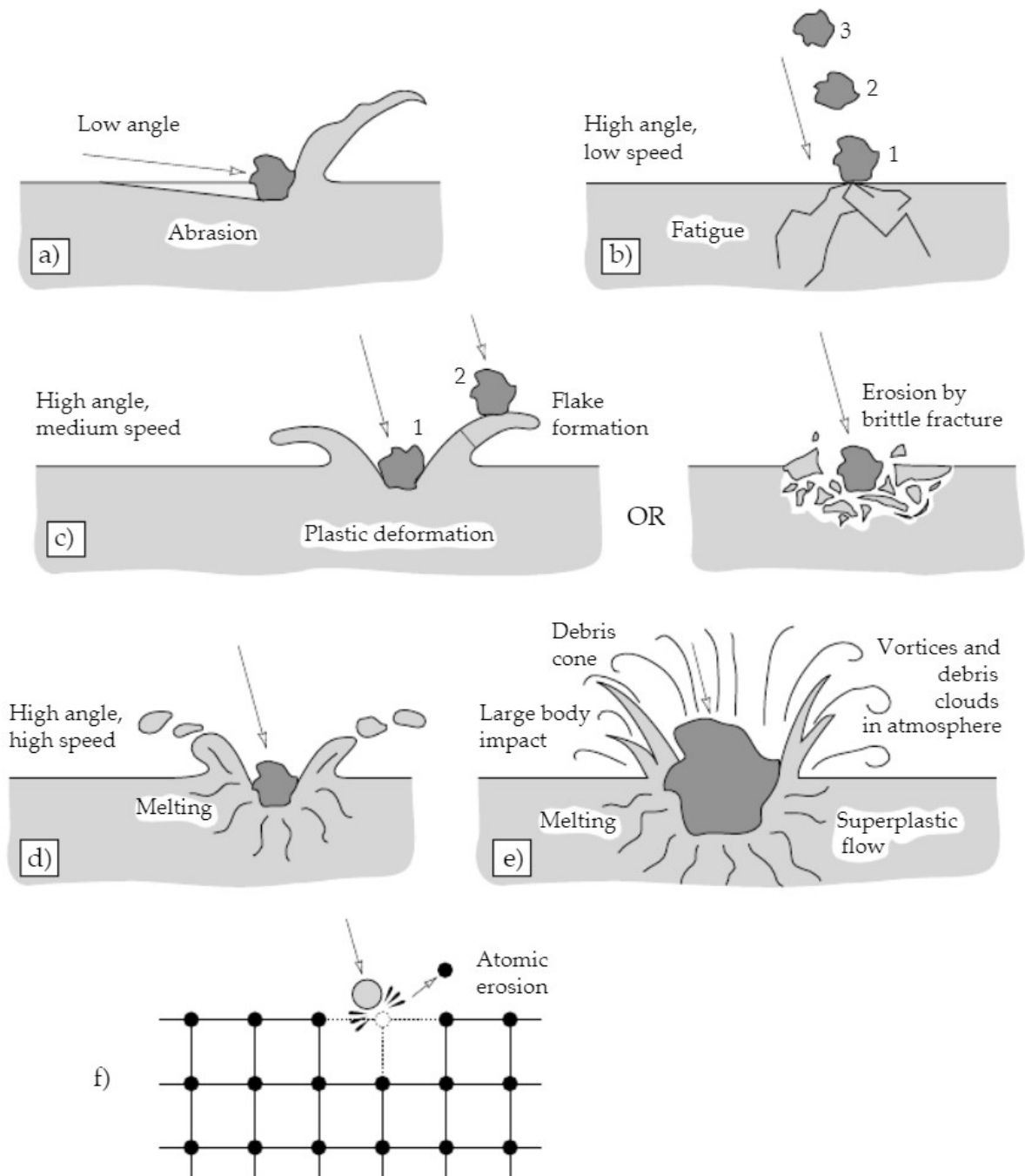


Figura 8 - Possíveis mecanismos de erosão.
Fonte: STACHOWIAK, 2014.

Nos itens da Figura 9 tem-se: a) abrasão em ângulos de baixo impacto, b) fadiga superficial em baixa velocidade, impacto de ângulo de impacto alto, c) fratura frágil ou deformação plástica múltipla durante velocidade média, impacto de ângulo de impacto grande, d) fusão superficial em altas velocidades de impacto, e) erosão macroscópica com efeitos secundários, f) degradação da rede cristalina do impacto pelos átomos.

Nos casos em que a erosão mostra um máximo em baixos ângulos de impacto, conclui-se que o "modo dúctil de desgaste erosivo" prevalece. Inversamente, se o máximo for encontrado em ângulos de alto impacto, então o "modo de fragilidade" é assumido.

2.3.1.4 Cavitação

O desgaste por cavitação é conhecido por danificar equipamentos como hélices ou pás de turbinas operando em vapor úmido e sedes de válvulas. O desgaste progride pela formação de uma série de buracos ou poços na superfície exposta à cavitação. Todo o componente da máquina pode ser destruído por este processo. O funcionamento do equipamento, por exemplo, hélices, é muitas vezes limitado por fortes vibrações causadas por danos na cavitação (STACHOWIAK, 2014).

A erosão por cavitação surge quando um sólido e um fluido estão em movimento relativo, e bolhas formadas no fluido se tornam instáveis e implodem contra a superfície do sólido. O dano causado por esse processo é encontrado em componentes como hélices de navios e bombas centrífugas (HALLING, 1978).

A estabilidade de uma bolha depende da diferença de pressão entre o interior e o exterior da bolha e a energia superficial da bolha. Este último fator é uma medida da energia liberada pelo colapso da bolha e do dano potencial no colapso. Assim, uma redução da tensão superficial do líquido reduz os danos, assim como o aumento da pressão de vapor (HALLING, 1978).

A característica da cavitação é a formação cíclica e o colapso de bolhas em uma superfície sólida em contato com um fluido. A formação de bolhas é causada pela liberação de gás dissolvido do líquido, onde sustenta uma pressão quase nula ou negativa. É provável que ocorram pressões negativas quando o fluxo de líquido entra em uma geometria divergente, ou seja, emergindo de um tubo de pequeno diâmetro para um tubo de grande diâmetro. A face a jusante de um objeto aguçado que se desloca em líquidos, por exemplo hélice de navio, é particularmente propensa à cavitação. O método ideal de prevenir a cavitação é evitar pressões negativas perto das superfícies, mas na prática isso é geralmente impossível (STACHOWIAK, 2014).

Quando uma bolha colapsa em uma superfície, o líquido adjacente à bolha é inicialmente acelerado e, em seguida, desacelerado bruscamente ao colidir com a superfície. A colisão entre líquido e sólido gera grandes tensões que podem danificar o sólido. Pressões transitórias de até 1.5 [GPa] são possíveis. O processo de colapso da bolha, juntamente com a evidência

experimental de um buraco formado em uma superfície de metal pelo colapso da bolha, é mostrado na figura 10 (KARIMI, 1986).

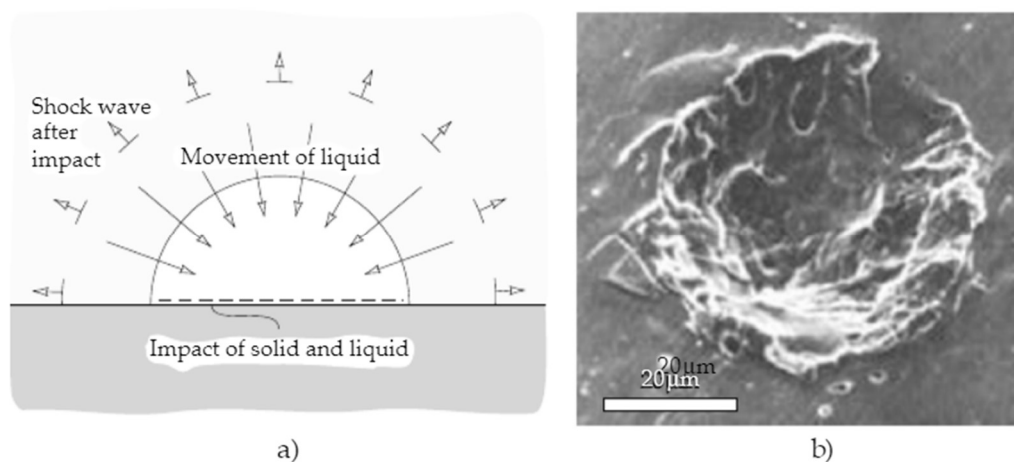


Figura 9 - Mecanismo de desgaste por cavitação: a) mecanismo de colapso da bolha e b) evidência experimental de dano por cavitação a uma superfície metálica (índio).

Fonte: KARIMI, 1986

A cratera de cavitação, mostrada na Figura 10, foi produzida na superfície do índio, que é mole. Materiais mais duros, como a cerâmica, provavelmente não formarão um buraco profundo sob as mesmas condições. Fracionamento e fragmentação são os modos predominantes de desgaste de cavitação para materiais frágeis duros. Quase todos os materiais sofrem algum tipo de dano subsuperficial por cavitação e o endurecimento do trabalho acumulado e a formação de rachaduras são comumente observados (TRETHERWEY, 1988).

Em alguns casos, quando a cavitação é intensa, a densidade dos orifícios pode ser suficiente para reduzir o material desgastado a uma matriz porosa ou "esponja". Embora a cavitação envolva um processo semelhante de colisão entre um líquido e um sólido, como ocorre na erosão por líquidos, há algumas diferenças significativas. O desgaste por cavitação é um processo muito mais suave do que o desgaste erosivo líquido. Na cavitação, partículas de desgaste são separadas por milhões de cavitações, enquanto apenas alguns poucos impactos por gotículas são suficientes para causar desgaste erosivo (PREECE, 1980).

O desgaste por cavitação tem um "período de incubação", como o desgaste erosivo, mas o ganho de peso encontrado no desgaste erosivo não é possível, a menos que o material cavitado absorva o líquido.

2.3.1.5 Desgaste Corrosivo

O desgaste corrosivo é um termo geral relacionado a qualquer forma de desgaste mecânico (adesivo, abrasivo, erosivo, fadiga, atrito, etc.) que é combinado com um processo

químico ou corrosivo. Hoje em dia, um termo "tribocorrosão" é frequentemente usado ao invés de "desgaste corrosivo", especialmente nos casos em que a corrosão eletroquímica interage com danos mecânicos. Os problemas de tribocorrosão são amplamente difundidos e podem ser encontrados nas indústrias mineral, nuclear, de transporte, de manufatura e de produção de alimentos e drogas. O uso crescente de materiais de engenharia como implantes em corpos humanos adicionou outro ambiente onde reações de tribocorrosão frequentemente causam efeitos adversos (STACHOWIAK, 2014).

Quando o atrito ocorre em um ambiente corrosivo, gasoso ou líquido, ocorrem reações de superfície e os produtos de reação são encontrados em uma ou ambas as superfícies. Esses produtos de reação são comumente pouco aderentes às superfícies, e a fricção adicional causa sua remoção. Este processo é então repetido. Assim, o desgaste corrosivo requer corrosão e atrito. A taxa de crescimento de, digamos, uma película de óxido sobre um aço diminuirá exponencialmente com o tempo e, portanto, a menos que a película de óxido seja removida por fricção, a reação metal-a-óxido tornar-se-á rapidamente insignificante. A operação detalhada do desgaste corrosivo é extremamente complexa. Os produtos de reação dependem da composição exata do ambiente. Por exemplo, pequenas quantidades de vapor de água no ar fazem com que o produto de reação seja o hidróxido em vez do óxido. Mecanismos que operam em um ambiente industrial ou perto da costa geralmente corroem mais rapidamente do que aqueles que operam em ar 'limpo' (HALLING, 1978).

As reações químicas superficiais que são benéficas na prevenção do desgaste adesivo irão, quando recolhidas, levar a uma perda considerável do material subjacente. Se um material (metal) é codificado para produzir uma membrana em sua superfície enquanto é simultaneamente submetido a um contato deslizante, então um dos quatro processos seguintes pode ocorrer (RENGSTORFF, 1986; DEARNLEY, 2004):

- Uma membrana fraca que tenha um tempo de vida curto sob contato deslizante pode ser produzida e uma alta taxa de desgaste pode ocorrer devido à destruição e regeneração regulares das membranas. O coeficiente de atrito pode ou não ser baixo neste caso,
- as películas de superfície de proteção podem ser usadas (por exemplo, por pite) e um acoplamento galvânico entre as restantes películas e o substrato subjacente pode resultar na corrosão rápida da área desgastada na superfície, e

- os processos corrosivos e de desgaste podem agir de forma quase independente para causar uma perda de material que é simplesmente a soma desses dois processos somados.

Esses modelos hipotéticos de desgaste corrosivo são ilustrados esquematicamente na figura 11.

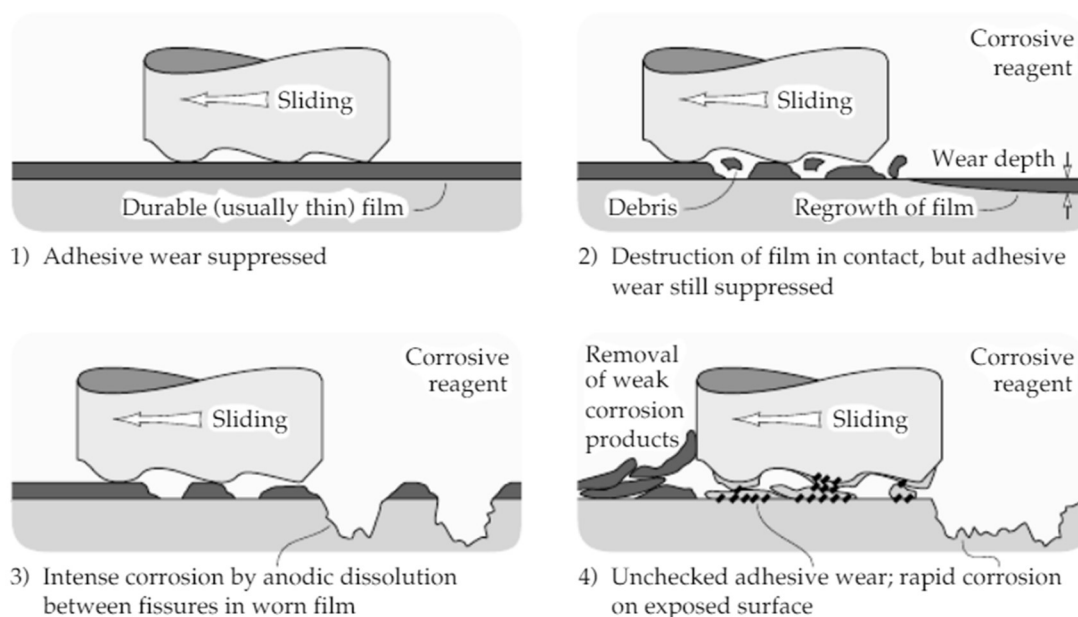


Figura 10 - Modelos de interação entre um agente corrosivo e uma superfície desgastada.
Fonte: STACHOWIAK, 2014.

O primeiro processo é dominado pela formação de camadas duráveis de produtos de corrosão que podem ser usadas como películas lubrificantes. Se tais películas prevalecerem, os contatos desgastados estarão bem protegidos e não ocorrerá desgaste corrosivo. Infelizmente, muito poucas películas de produtos de corrosão são duráveis para resistir ao desgaste mecânico (a menos que seja um contato levemente carregado [Garcia, 2001]), de modo que essa categoria de formação de filme raramente é vista na prática.

O segundo processo está relacionado à formação de uma película de corrosão sacrificial ou de vida curta, que é periodicamente removido e recolocado sob contatos deslizantes. Esta é a forma mais comum de desgaste corrosivo. Quando películas de produtos corrosivos insolúveis são formados em meios não-aquosos, o metal ou liga é 'passivado' neste meio ambiente (Garcia, 2001; Dearnley, 2004). Os filmes de corrosão geralmente consistem em óxidos frágeis, geralmente hidratados ou outros compostos iônicos, e são removidos com facilidade em contatos móveis. Por exemplo, os óxidos de ferro são extremamente frágeis, mas temperaturas muito altas (HOLMES, 1972).

O terceiro processo mostrado na Figura 13.1 refere-se ao desgaste em corrosão sob o meio altamente corrosivo, por ex. corrosão por pite ou galvânica, ocorre nas áreas ativas e interfere com o processo de repassivação. O quarto processo é efetivamente limitado a ambientes extremamente corrosivos, onde os produtos de corrosão são muito fracos e, em sua maioria, solúveis nos meios líquidos (STACHOWIAK, 2014).

É improvável que o desgaste e a corrosão, se ocorridos no mesmo sistema, possam prosseguir de forma inteiramente independente, uma vez que o calor e a agitação mecânica e a deformação de um contato deslizante acelerariam quase inevitavelmente a corrosão. Nas últimas duas décadas, esforços substanciais de pesquisa no campo emergente da tribocorrosão foram direcionados para a elucidação dos efeitos sinérgicos da corrosão e do desgaste (LANDOLT, 2011). A dificuldade de analisar o desgaste corrosivo deve ser enfatizada aqui, pois as várias interações dependem fortemente da microestrutura e química dos materiais, das condições de contato (carga, velocidade, temperatura e geometria de contato) e das características físico-químicas do ambiente.

2.3.1.6 Fadiga Superficial

Em muitos contatos bem lubrificados, a adesão entre as duas superfícies é insignificante, mas ainda há uma taxa significativa de desgaste. Este desgaste é causado por deformações sustentadas pelas asperezas e camadas superficiais quando as asperezas das superfícies opostas entram em contato. Os contatos entre asperidades acompanhados por muito estresse local são repetidos um grande número de vezes no curso de deslizamento ou rolagem, e as partículas de desgaste são geradas por trincas propagadas por fadiga, daí o termo "desgaste por fadiga". O desgaste sob essas condições é determinado pela mecânica de iniciação de fissuras, crescimento de fissuras e fraturas. Superfícies desgastadas contêm níveis muito altos de tensão plástica em comparação com superfícies não-desgastadas. Esta tensão e a consequente modificação da microestrutura do material têm um forte efeito nos processos de desgaste (STACHOWIAK, 2014).

O termo "fadiga de contato" ou "fadiga superficial" comumente usados na literatura é o jargão técnico para danos de superfície causados por um contato repetido de rolamento. Refere-se ao dano inicial em uma superfície lisa e é mais frequentemente usado no contexto de rolamentos. Os rolamentos contam com superfícies de contato lisas e sem danos para um funcionamento confiável. Um certo número de ciclos de contato de rolagem deve decorrer antes que os defeitos de superfície sejam formados, e sua formação é denominada "fadiga de contato". Uma vez que as superfícies de rolamento de um rolamento estejam desgastadas, seu uso

posterior é evitado devido à vibração excessiva causada pelas cavidades que passam pelo contato de rolagem. A falha do rolamento causada por fadiga de contato é geralmente repentina e é altamente indesejável, especialmente quando o rolamento que é crítico para o funcionamento adequado da máquina, por exemplo, num motor a jacto, está envolvido. É uma experiência comum que quando um rolamento falhando, por exemplo, em um eixo de carro, geralmente é necessária muita desmontagem e remontagem de trabalho intensivo. Por estas razões, a fadiga de contato, particularmente dos contatos de metal lubrificado, tem sido o tema da maioria dos programas de pesquisa relacionados ao desgaste sob contato de rolagem (STACHOWIAK, 2014).

O exame de superfícies metálicas desgastadas na seção transversal revela intensa deformação do material diretamente abaixo da superfície desgastada. Por exemplo, foi demonstrado que as subcondições de deslizamento severo com um coeficiente de atrito próximo à unidade, material dentro de 0,1 [mm] da superfície é deslocado na direção do deslizamento devido à deformação causada pela força de atrito. Além disso, perto da superfície, a estrutura de grãos é desenhada e orientada paralelamente à superfície de desgaste (SODA, 1975). Obviamente, sob os coeficientes de fricção mais baixos que ocorrem nos sistemas lubrificados, esta deformação superficial é menos proeminente ou pode até estar ausente.

As deformações causadas pelo cisalhamento no deslizamento estão presentes em alguma profundidade abaixo da superfície, atingindo os valores extremos na superfície. Os níveis de tensão em uma camada superficial deformada são ilustrados esquematicamente na figura 12 (RIGNEY, 1979).

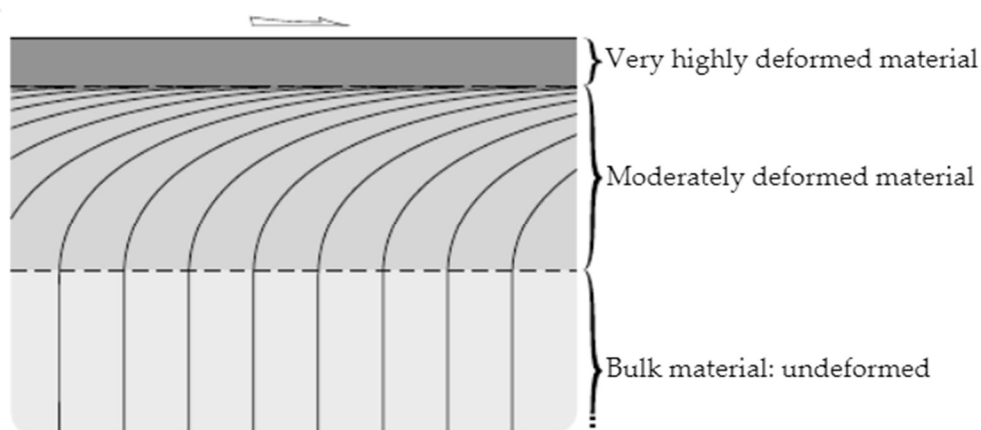


Figura 11 - Níveis de tensão em uma superfície deformada.
Fonte: RIGNEY, 1979.

A tensão induzida pelo deslizamento finalmente quebra a estrutura de grão original na superfície para formar células de deslocamento. Essas células podem ser descritas como regiões submicrométricas, relativamente livres de deslocamentos, que são separadas por regiões (paredes) de deslocamentos altamente emaranhados (GARBAR, 1978). Uma estrutura celular diretamente abaixo de superfícies desgastadas de materiais metálicos foi observada em estudos de microscopia eletrônica de transmissão. A nova estrutura é semelhante, se não idêntica, à estrutura que ocorre em metais fortemente trabalhados (RIGNEY, 1979).

2.4 Lubrificação

Em termos simples, a função de um lubrificante é controlar o atrito e o desgaste em um dado sistema. Os requisitos básicos, portanto, estão relacionados ao desempenho do lubrificante, ou seja, sua influência sobre as características de atrito e desgaste de um sistema. Outro aspecto importante é a qualidade do lubrificante, que reflete sua resistência à degradação em serviço. A maior parte da pesquisa atual de 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 equipamento operacional, um óleo pode causar corrosão das superfícies em contato. A qualidade do óleo, no entanto, não é a única consideração. Considerações econômicas também são importantes. Por exemplo, em grandes máquinas com vários milhares de litros de óleo lubrificante, o custo do óleo pode ser muito alto (STACHOWIAK, 2014).

O termo lubrificante geralmente sugere óleo ou graxa simplesmente porque são os lubrificantes mais comuns em uso; mas eles não são exclusivos e, de fato, qualquer fluido pode ser usado como lubrificante nas circunstâncias certas. Em aplicações modernas, uma ampla gama de fluidos é usada como lubrificante. Os rolamentos de ar ou gás são agora bastante comuns, existem numerosos exemplos do uso de água como lubrificante e há um uso crescente de fluidos de processo, sendo um exemplo bastante exótico o uso de sódio líquido como lubrificante em reatores nucleares. Em algumas situações são usados lubrificantes sólidos, mas a ênfase principal neste capítulo é sobre lubrificantes fluidos (HALLING, 1978).

A propriedade mais importante de um óleo para lubrificação é sua viscosidade. A viscosidade fornece uma medida da resistência de um fluido ao fluxo de cisalhamento e pode ser definida como tensão de cisalhamento em um plano dentro do fluido, por unidade de gradiente de velocidade normal a esse plano (HUTCHINGS, 1992).

A viscosidade de um fluido pode ser definida qualitativamente como a sua resistência ao escoamento, e os líquidos são frequentemente descritos como "grossos" ou "finos" o que é na verdade uma avaliação visual arbitrária da sua viscosidade (HALLING, 1978).

O parâmetro que desempenha um papel fundamental na lubrificação é a viscosidade do óleo. Óleos diferentes exibem diferentes viscosidades. Além disso, a viscosidade do óleo muda com a temperatura, a razão de cisalhamento e a pressão e a espessura do filme de óleo gerado é geralmente proporcional a ele. Assim, à primeira vista, parece que os óleos mais viscosos proporcionariam melhor desempenho, uma vez que as películas geradas seriam mais espessas e uma melhor separação das duas superfícies em contato seria alcançada. Infelizmente, este não é sempre o caso, uma vez que os óleos mais viscosos requerem mais energia para serem cortados. 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. Para aplicações de engenharia, a viscosidade do óleo é geralmente escolhida para proporcionar um ótimo desempenho na temperatura exigida. Conhecer a temperatura que o óleo deve operar é crítico, pois a viscosidade do óleo é extremamente dependente da temperatura. A viscosidade de diferentes óleos varia em diferentes taxas com a temperatura. Também pode ser afetado pelas velocidades das superfícies de operação (taxas de cisalhamento). O conhecimento das características de viscosidade de um lubrificante é, portanto, importante no projeto e na previsão do comportamento de um sistema mecânico lubrificado (STACHOWIAK, 2014).

2.5 Disco de Embreagem

Após todo o embasamento teórico feito sobre a tribologia e suas subdivisões realizado nas seções anteriores, esta seção tem por finalidade realizar um estudo aprofundado sobre o disco de embreagem, que é o objeto sobre o qual será feita toda a pesquisa tribológica prática deste trabalho a ser apresentada nos capítulos posteriores.

Já na época da concepção do primeiro carro comercial esse era baseado num motor a combustão, uma caixa de câmbio e um elemento de acoplamento entre eles. De acordo com Shaver (1997), através da história, o desenvolvimento do material de atrito, de uma maneira geral, influenciava nos projetos das embreagens.

Com o tráfego pesado da cidade ou ao dirigir em terrenos irregulares, devemos mudar as marchas a cada 15 a 25 segundos. Como resultado, em veículos equipados com transmissão mecânica de vários estágios, cada 100 km de pista pode responder por 1.000 a 1.500 desligamentos da embreagem de fricção (BLOKHIN, 2015).

Uma embreagem é um membro da máquina usado nos eixos de transmissão. Algumas placas de fricção, às vezes conhecidas como placas de embreagem, são mantidas entre esses dois eixos. Todo este conjunto é conhecido como embreagem, como visto na Figura 13 (NARAYAN, 2018).

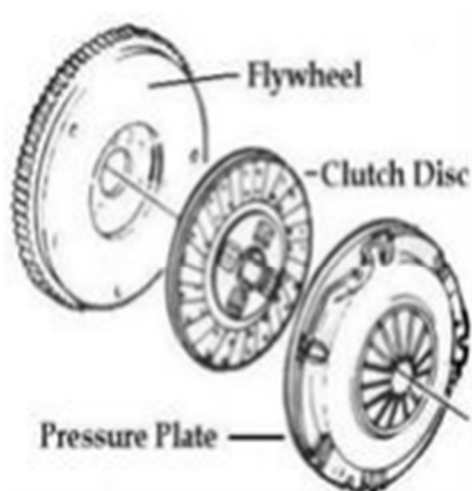


Figura 12 - Embreagem e volante
Fonte: NARAYAN, 2018.

A embreagem é baseada na fricção. Quando duas superfícies de atrito entram em contato e são pressionadas, elas se unem devido à força de atrito entre elas. O atrito entre essas duas superfícies depende da área de superfície, da pressão aplicada sobre elas e do material de atrito entre elas (NARAYAN, 2018).

Uma embreagem é comumente usada em veículos automotivos para transferência de energia do motor para o sistema de transmissão. Como uma embreagem tem que ser substituída muitas vezes antes que o carro chegue ao fim de sua vida útil, torna-se necessário aumentar sua vida útil. A vida útil de uma embreagem é altamente dependente da vida e do desempenho da placa da embreagem. Um sistema de embreagem de fricção a seco para automóveis consiste em um volante, placa de embreagem e uma placa de pressão (ALI, 2017).

Disco de embreagem entra em contato direto com o volante do motor para transmissão de potência. Consiste em material de atrito em ambos os lados e uma almofada axial é imprensada entre eles. O revestimento de fricção é usado para evitar o deslizamento entre as

duas superfícies de contato. A face lateral do motor do revestimento de fricção se une ao volante, enquanto o lado da transmissão se une à placa de pressão. Quando uma embreagem é engatada, o movimento relativo devido ao escorregamento entre as superfícies de contato de um sistema de embreagem resulta em altas temperaturas de superfície que podem levar a rachaduras na superfície, maior taxa de desgaste e distorções permanentes que podem causar falha prematura das superfícies de contato (ALI, 2017).

A principal função de um sistema de embreagem é acoplar e desacoplar o motor à caixa de câmbio para trocar as marchas, com o máximo de conforto possível para os motoristas.

O funcionamento básico do mecanismo de uma embreagem de fricção, é descrito por Saleh (2017) como tendo um eixo rotativo do qual a energia deve ser transmitida, chamada de eixo do motorista; e há um eixo para o qual a energia é transmitida, chamada de eixo acionado. Para levar a energia do acionador para a embreagem do eixo acionado, é acionado. Acoplar a embreagem significa reduzir o espaço físico entre as partes rotativas e forçar as duas superfícies a entrar em contato. Como uma parte está em movimento e a outra parte está estacionária, há um movimento relativo entre elas. Isso cria atrito e, como resultado, causa a transferência de força ou torque.

O membro acionador de uma embreagem é o volante montado no virabrequim do motor e o membro acionado é montado no eixo acionador da placa de pressão, de modo que o eixo acionado possa ser acionado ou parado à vontade, sem parar a direção, como mostrado por Narayan (2018). Existem três estados em que a embreagem pode ser encontrada. Esses estados estão desengatados, a embreagem escorregando e engatada. No automóvel, uma caixa de câmbio é necessária para alterar a velocidade e o torque do veículo, conforme analisado por Buzzoni (2017) e Fang (2017).

Se mudarmos de marcha, quando o motor estiver engatado com a caixa de velocidades ou quando as engrenagens estiverem em posição de marcha, pode causar desgaste das engrenagens. Para superar este problema, é utilizada uma embreagem entre a caixa de velocidades e o motor. A embreagem é o primeiro elemento do trem de força. A principal função da embreagem é acoplar e desacoplar o motor à transmissão, quando o motorista precisar ou durante a troca de marchas. Quando a embreagem está na posição engatada, a potência flui do motor para a roda e quando está na posição de desengate, a potência não é transmitida como visto por Zhao (2017).

Uma embreagem de fricção tem sua principal aplicação na transmissão de potência de eixos e máquinas que devem ser acionadas e paradas com frequência. A força de fricção é usada para iniciar o eixo acionado a partir do repouso e, gradualmente, trazê-lo até a velocidade adequada sem deslizar excessivamente as superfícies de atrito. Nos automóveis, a embreagem de fricção é usada para conectar o motor ao eixo de acionamento (NARAYAN, 2018).

Embreagens de engate gradual como as embreagens de fricção são amplamente utilizadas em aplicações automotivas para a transmissão de torque do volante para a transmissão. Os três principais componentes de um sistema de embreagem são o disco de embreagem, o volante e a placa de pressão. O volante é conectado diretamente ao virabrequim do motor e, portanto, gira à rotação do motor. Aparafusado ao volante da embreagem é o segundo maior componente: a placa de pressão da embreagem. A placa de pressão com mola tem dois trabalhos: manter o conjunto da embreagem unido e liberar a tensão que permite que o conjunto gire livremente. Entre o volante e a placa de pressão está o disco de embreagem. O disco de embreagem possui superfícies de atrito semelhantes a uma pastilha de freio em ambos os lados que fazem ou quebram o contato com as superfícies do volante de metal e da placa de pressão, permitindo o engate e o desengate suaves. (NARAYAN, 2018).

Basicamente, um sistema de embreagem pode ser dividido em três partes: conjunto da tampa da embreagem, disco e sistema de liberação. A figura 14 ilustra uma cobertura de embreagem com suas partes principais realçadas (GREGORI, 2014).

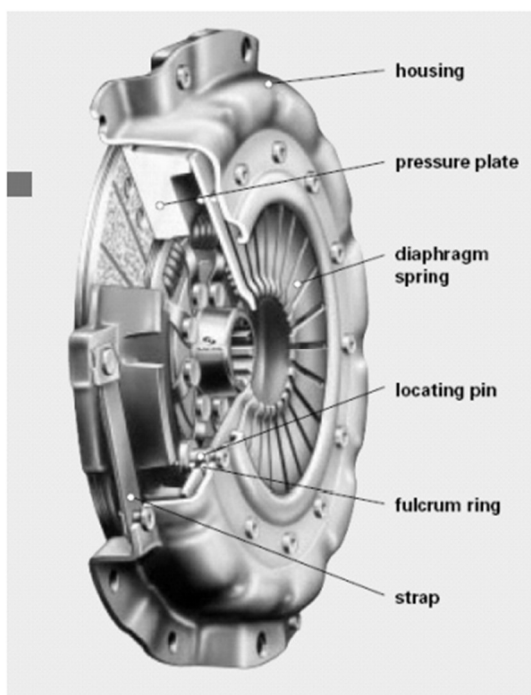


Figura 13 - Um conjunto de embreagem
 Fonte: GREGORI, 2014.

A mola do diafragma é responsável pela carga da braçadeira e pela placa de pressão para aplicar essa força no disco. Considerando um bom nível de atrito entre o disco e a placa de pressão, o torque pode ser transmitido do motor para a caixa de engrenagens (GREGORI, 2014).

Quando a embreagem começa a se engatar, a pressão de contato entre as superfícies de contato aumentará para um valor máximo no final do período de escorregamento e continuará estável durante o período de engajamento total. Durante o período de escorregamento, grande quantidade de energia térmica é gerada nas superfícies de contato, que é convertida em energia térmica pela primeira lei da termodinâmica. O calor gerado é dissipado pela condução entre os componentes da embreagem e a convecção para o meio ambiente. Outra condição de carga é o contato de pressão entre as superfícies de contato que ocorre devido à força axial aplicada na mola do diafragma. Além das respostas de saída acima, este trabalho também considera as características de vibração da placa de embreagem durante o período de engajamento total. O motor e os componentes da transmissão sofrem cargas dinâmicas durante a operação normal. Isso causará vibrações e, portanto, deve-se projetar o sistema de embreagem de modo a evitar ressonância com a transmissão e os componentes do motor, conforme mostrado por Fang (2017).

3 METODOLOGIA

O presente capítulo apresenta a metodologia empregada nesta pesquisa. Para tal, é detalhado o tipo de pesquisa e os materiais e métodos adotados. Em seguida, são apresentadas as variáveis e indicadores que regem a problemática abordada neste texto. Por fim, são expostos os instrumentos de coleta de dados, o procedimento para tabulação dos mesmos e as considerações finais do capítulo.

3.1 Tipo de Pesquisa

Uma pesquisa pode ser classificada como quantitativa ou qualitativa. O método quantitativo pode ser definido como aquele que apresenta quantificações tanto na coleta de informações, quanto em seu tratamento por meio de técnicas estatísticas. Sendo assim, este tipo de investigação mostra-se mais apropriado quando existe a possibilidade de recolher medidas quantificáveis de variáveis, de maneira objetiva e sistematizada (LAKATOS e MARCONI, 2006).

Ainda de acordo com Lakatos e Marconi (2006), o método qualitativo considera que há uma relação dinâmica entre o mundo real e o sujeito, isto é, um vínculo indissociável entre o mundo objetivo e a subjetividade do sujeito que não pode ser traduzido em números. A interpretação dos fenômenos e a atribuição de significados são básicas no processo de pesquisa qualitativa. Não requer o uso de métodos e técnicas estatísticas.

Sendo assim, esse trabalho é classificado como uma pesquisa quantitativa, pois tem o objetivo de coletar informações quantificáveis de variáveis e tratá-las tecnicamente.

Uma pesquisa pode ser também classificada quanto aos objetivos como: exploratória, explicativa e descritiva.

De acordo com Alyrio (2008), a pesquisa exploratória é caracterizada pela existência de poucos dados disponíveis, em que se procura aprofundar e apurar ideias e a construção de hipóteses. A pesquisa explicativa estuda fatores que determinam a ocorrência de determinados fenômenos. Já na pesquisa descritiva se busca essencialmente a enumeração e a ordenação de dados, sem o objetivo de comprovar ou refutar hipóteses exploratórias, abrindo espaço para uma nova pesquisa explicativa, fundamentada na experimentação.

Sendo assim, o presente trabalho pode ser classificado como pesquisa exploratória, quanto aos objetivos e ainda quanto ao meio de investigação, esse trabalho é considerado uma pesquisa bibliográfica, pois se fundamenta em diversos conceitos da Tribologia.

3.2 Materiais e Métodos

Neste experimento, vários testes e medidas foram feitas visando achar um valor padrão do coeficiente de fricção de dois tipos de discos de rolamento. Para isso, um passo a passo foi realizado conforme organograma da Figura 15.

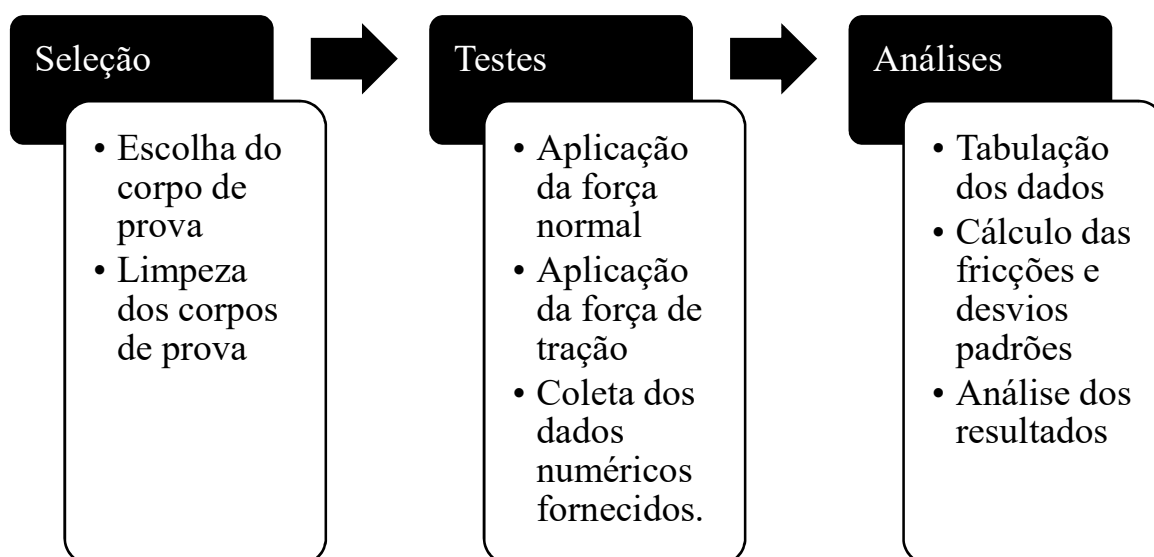


Figura 14 - Organograma dos experimentos.
Fonte: Pesquisa Direta (2019)

Os seguintes modelos de discos de embreagem foram utilizados como corpo de prova: STIEBER AA30 ID, apresentado na figura 16, e RINGSPANN FXM51-25 NX, apresentado na figura 17.



Figura 15 – Disco de embreagem AA30
Fonte: Pesquisa Direta (2019)



Figura 16 – Disco de embreagem FXM51-25
Fonte: Pesquisa Direta (2019)

3.3 Variáveis e Indicadores

As variáveis e seus respectivos indicadores utilizados neste trabalho estão listados na Tabela 1:

Tabela 1 - Variáveis e Indicadores do trabalho

Variáveis	Indicadores
Fricção	Coeficiente médio Coeficiente máximo Força
Confiabilidade	Desvio Padrão Intervalo de confiança

Fonte: Pesquisa Direta (2019).

3.4 Instrumentos de coleta de dados

Os dados necessários para realização do trabalho foram coletados com os seguintes instrumentos:

- Equipamento de teste de fricção: Forças.

- Microsoft Excel: cálculo do desvio padrão, intervalo de confiança e os coeficientes médio e máximo.

Os testes para encontrar os valores padrão do coeficiente de fricção foram feitos da seguinte maneira:

Os discos eram posicionados em um equipamento de testes de atrito, mostrado na figura 20, que era capaz de aplicar uma força normal a eles. O local e o modo como os discos eram posicionados no equipamento podem ser vistos nas figuras 18 e 19.



Figura 17 - Visão mais próxima de onde os discos são posicionados.
Fonte: Pesquisa Direta (2019)



Figura 18 - Modo como o disco é posicionado.
Fonte: Pesquisa Direta (2019)



Figura 20 – Dispositivo usado no experimento
Fonte – Pesquisa Direta (2019)

Os discos foram colocados na garra, em seguida é aplicada a força normal pelos colchetes do equipamento. O valor dessa força é inicialmente de 20kN e posteriormente de 12kN. Essa redução é feita para não forçar demais o motor, que é um LINAK com carga máxima

de tração de 10kN. Não foi notada variação significativa dos valores de coeficiente de fricção após essa mudança, sendo que a alteração ocorreu entre os ensaios 41 e 42.

O material de ambos os discos é 16 MnCrS 5. E o material dos colchetes usados para aplicar a força normal é 42 CrMo 4.

Após a aplicação da força normal, os rolamentos são tracionados para cima pelo motor.

Com sensores aplicados no dispositivo, essas duas operações fornecem a força normal e o valor da tração, que são usados para calcular o valor do coeficiente de fricção através da equação 1.

Com o valor do coeficiente de fricção calculado, um gráfico como o da figura 21 era plotado com os valores para ajudar na análise dos resultados.

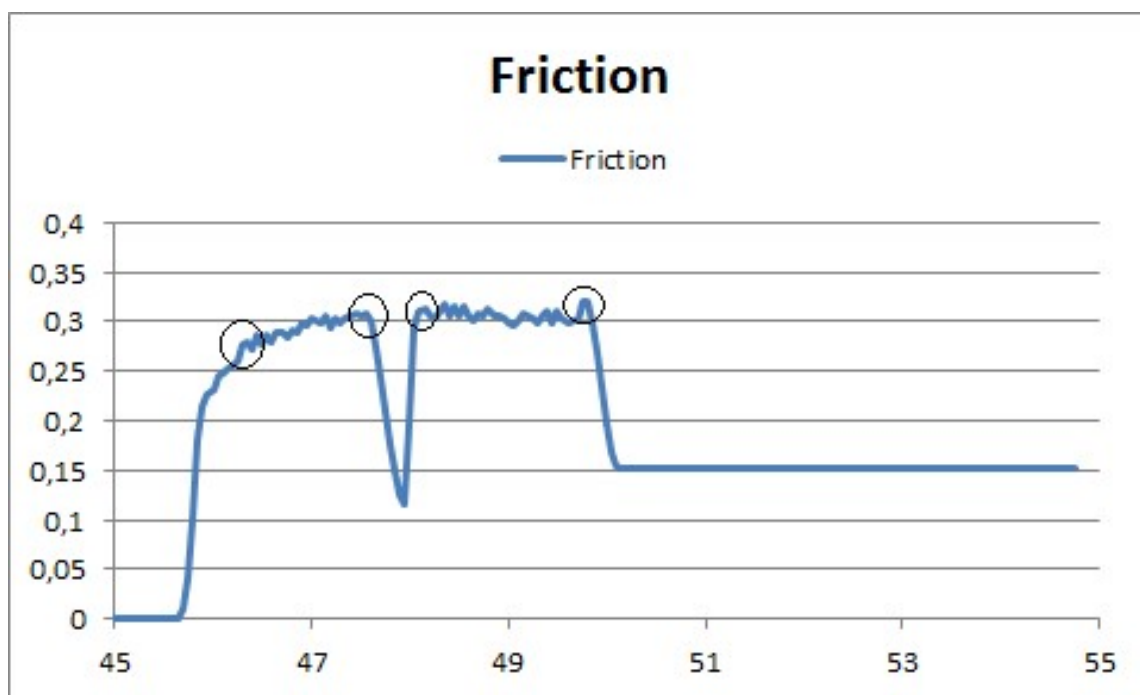


Figura 19 - Gráfico exemplo mostrando a variação do coeficiente de atrito durante um ensaio.
Fonte: Pesquisa Direta (2019)

Em cada topo deste gráfico cuja abscissa é o tempo(s) e a ordenada é o coeficiente de atrito, o primeiro e o último ponto eram tomados como o valor do coeficiente de fricção, desconsiderando a variação aleatória entre eles. Neste caso, os pontos circulados foram os utilizados. Na maioria dos casos foram utilizados 4 pontos, assim como neste.

3.5 Tabulação dos dados

A tabulação dos dados foi feita utilizando os seguintes softwares:

- Microsoft Excel: para entrada de dados e elaboração dos gráficos.
- Microsoft Word: para descrição dos resultados.

4 RESULTADOS

Para embreagens de roda livre, as condições de atrito na articulação de fricção são de grande importância. A fim de obter uma boa base para cálculos adicionais e para uma comparação entre resultados experimentais e computacionais, um conhecimento tão bom quanto possível do atrito real é vital. No presente capítulo serão apresentados os detalhes da pesquisa, incluindo quais corpos de prova foram utilizados, os equipamentos necessários, como os ensaios foram realizados e como foi feita a coleta de dados para posteriores cálculos e análises comparativas.

4.1 Cálculo e análise gráfica

A partir desses pontos, o valor máximo e mínimo do coeficiente de fricção para cada teste foi calculado, bem como seu valor médio, o desvio padrão e o intervalo de confiança. Posteriormente, todos os valores de cada experimento foram agrupados.

Para fazer esses cálculos foram usadas as seguintes fórmulas:

$$\text{Desvio padrão: } \sigma = \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n}} \quad (7)$$

$$\text{Intervalo de confiança} = \bar{x} \pm 1.96 * \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (8)$$

Sendo:

- σ – Desvio Padrão
- x – Valor individual
- $\bar{x}$ – Média dos valores
- n – Número de valores

Cada tipo de disco foi testado variando dois importantes fatores, limpeza e se o disco já havia sido usado anteriormente ou se estava sendo usado pela primeira vez. Nos testes, a limpeza foi realizada com propanol e os discos 1 de cada modelo já haviam sido previamente utilizados.

A tabela 2 mostra os resultados levando em consideração as variáveis e parâmetros previamente mencionados.

Tabela 2 - Resultados dos experimentos

Expt.	Modelo	Disco	Estado	Nº de testes	Fricção média	Fricção Máxima	Desvio Padrão	Intervalo de Confiança
1	AA30	1	Limpo	10	0,334	0,466	0,05772	0,03577
2	AA30	1	Não tratado	20	0,469	0,603	0,08120	0,03559
3	AA30	3	Limpo	10	0,360	0,542	0,08098	0,05019
4	AA30	3	Não tratado	6	0,543	0,605	0,06850	0,05481
5	FXM51-25	1	Limpo	5	0,268	0,335	0,03626	0,03178
6	FXM51-25	1	Não tratado	20	0,469	0,62	0,10060	0,04409
7	FXM51-25	2	Limpo	7	0,259	0,341	0,03558	0,02636
8	FXM51-25	2	Não tratado	15	0,294	0,491	0,07390	0,03739
9	FXM51-25	2	Não tratado lubrificado	5	0,181	0,196	0,00610	0,00598

Fonte: Pesquisa Direta (2019).

Como mostrado na tabela anterior, a pesquisa foi dividida em nove experimentos, com dois modelos de discos diferentes e dois corpos de prova para cada modelo. Eles foram testados alternadamente variando as condições de limpeza e não tratamento e ao final da pesquisa alguns testes com lubrificação também foram realizados. A tabela mostra de maneira sucinta os valores médios e máximos do coeficiente de fricção de cada experimento, levando em conta todos os ensaios realizados, e apresenta os valores de desvio padrão e intervalo de confiança para que se tenha uma maior confiabilidade nos resultados da pesquisa.

A seguir estão apresentados os gráficos da média do coeficiente de fricção de cada experimento para uma análise mais detalhada.

Medidas realizadas com o modelo AA30 nas Figuras de 22 a 25

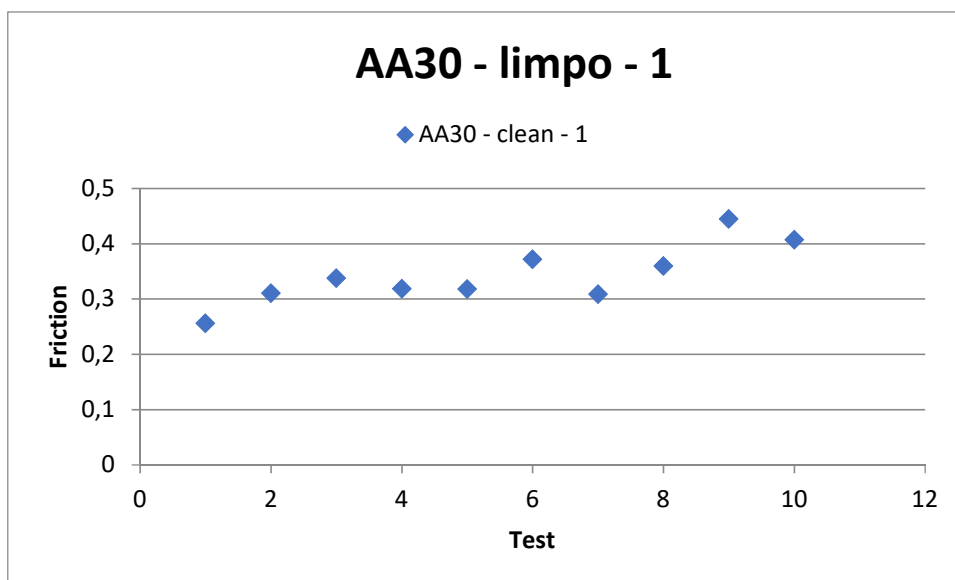


Figura 20 - Experimento 1, AA30 – limpo – 1
Fonte: Pesquisa Direta (2019)

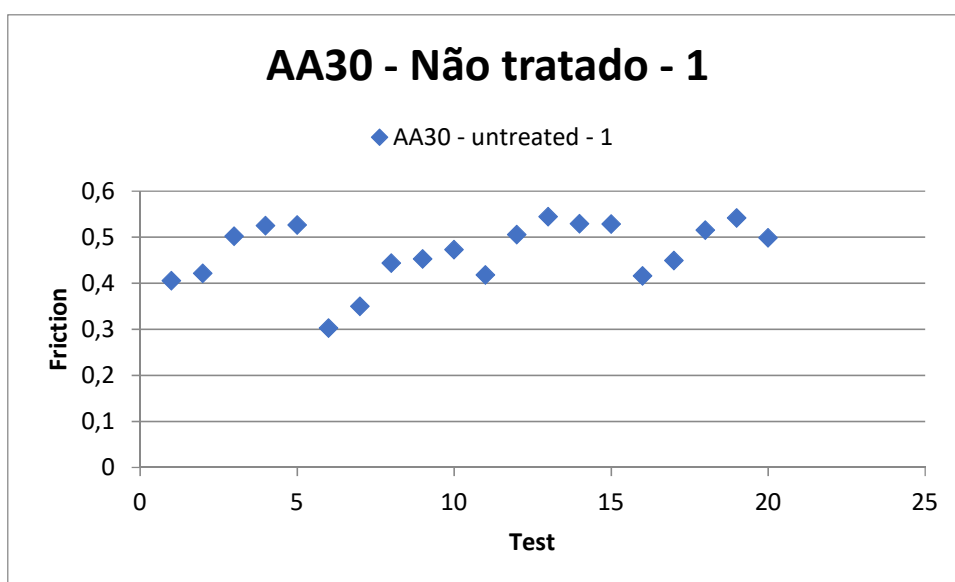


Figura 21 - Experimento 2, AA30 – não tratado – 1
Fonte: Pesquisa Direta (2019)

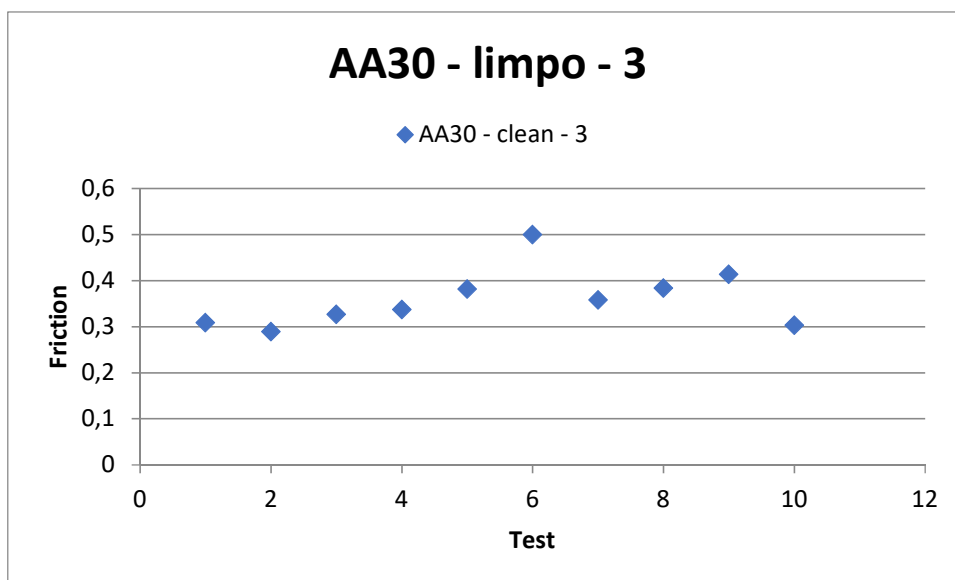


Figura 22 - Experimento 3, AA30 – limpo – 3

Fonte: Pesquisa Direta (2019)

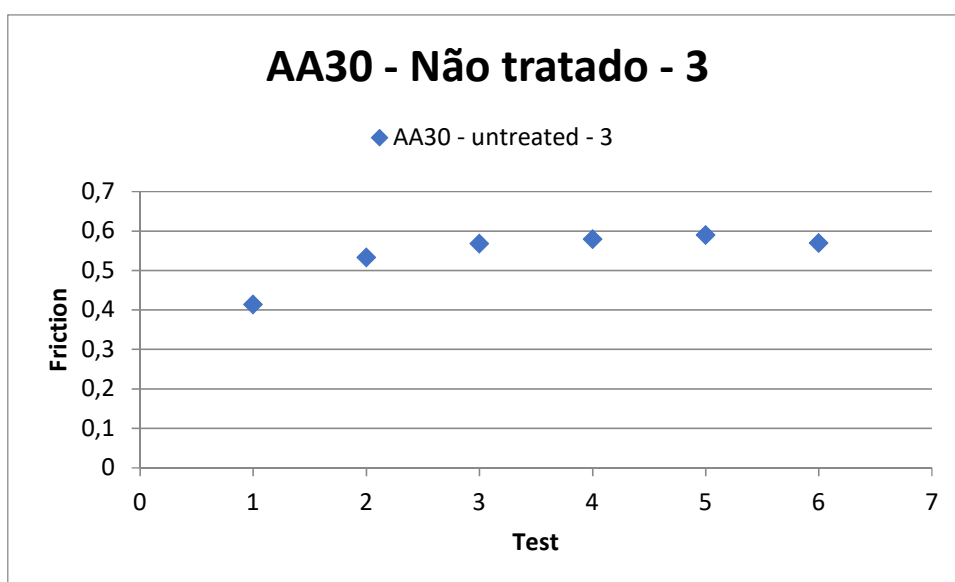


Figura 23 - Experimento 4, AA30 – não tratado – 3

Fonte: Pesquisa Direta (2019)

Observações:

- No experimento 2 (AA30 – não tratado – 1), o sistema foi completamente desmontado e remontado, e cada queda no gráfico é uma dessas desmontagens, nos testes feitos em sequência, é observado um comportamento ascendente da curva, e uma tendência de estabilização entre 0,5 e 0,6, No caso dos testes não tratados. Isso também pode ser observado no experimento 4 (AA30 – não tratado – 3), que foi testado ininterruptamente.

• No caso dos testes limpos, a maioria dos casos tiveram valores de coeficiente de fricção entre 0,3 e 0,4. Dentre todos os 20 testes em apenas quatro deles o valor ultrapassou 0,4. Então, o intervalo mencionado pode ser considerado confiável.

As figuras 26 e 27 mostram uma comparação dos experimentos realizados com os modelos AA30 nas mesmas condições, mas com os corpos de prova diferentes.

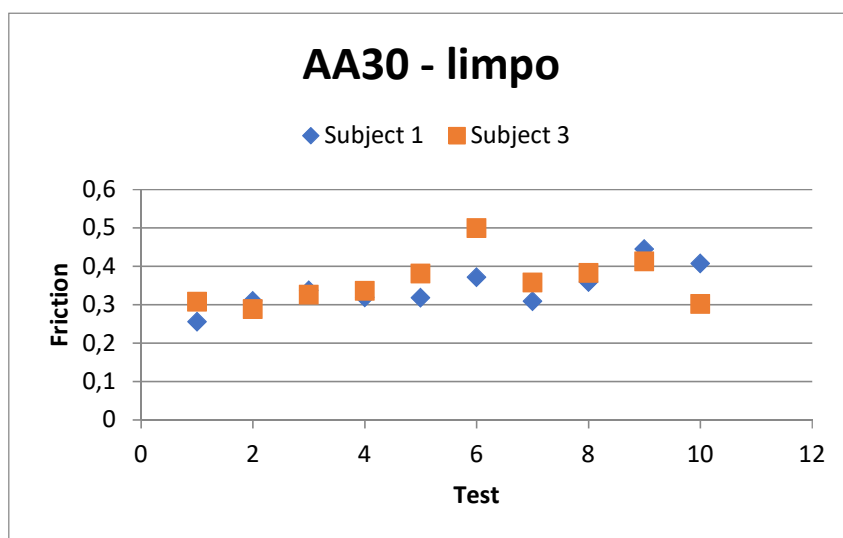


Figura 24 - AA30 – limpo, comparação
Fonte: Pesquisa Direta (2019)

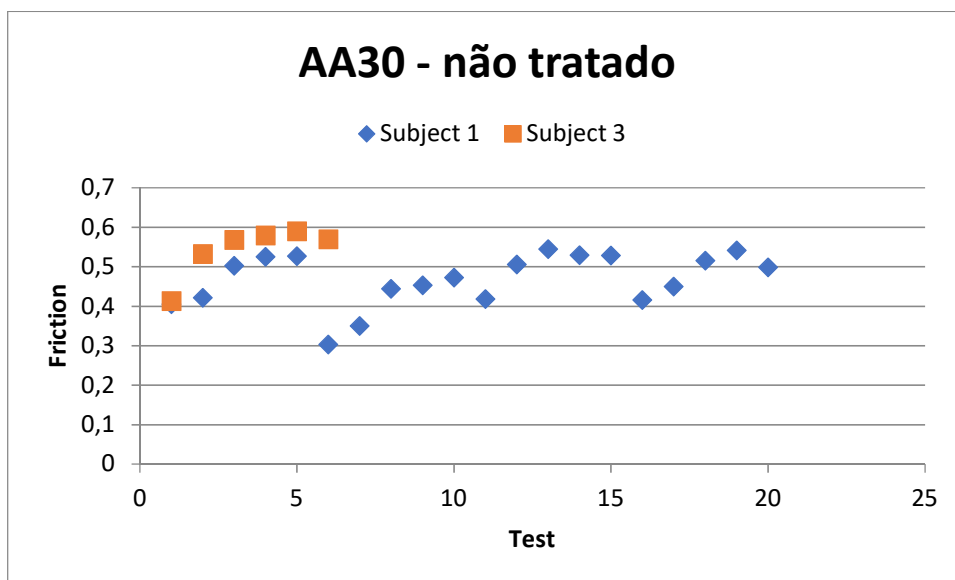


Figura 25 - AA30 – não tratado, comparação
Fonte: Pesquisa Direta (2019)

A comparação desses gráficos mostra que não há grande influência o fato de o disco ter sido previamente utilizado ou não, apenas sua limpeza, pois nota-se um valor muito semelhante

nos valores dos coeficientes de atrito para os experimentos realizados em condições similares. Sendo cerca de 0,3 e 0,4 para os limpos, e entre 0,4 e 0,6 para os não tratados.

A figura 28 mostra uma comparação entre os 4 experimentos realizados com o modelo AA30.

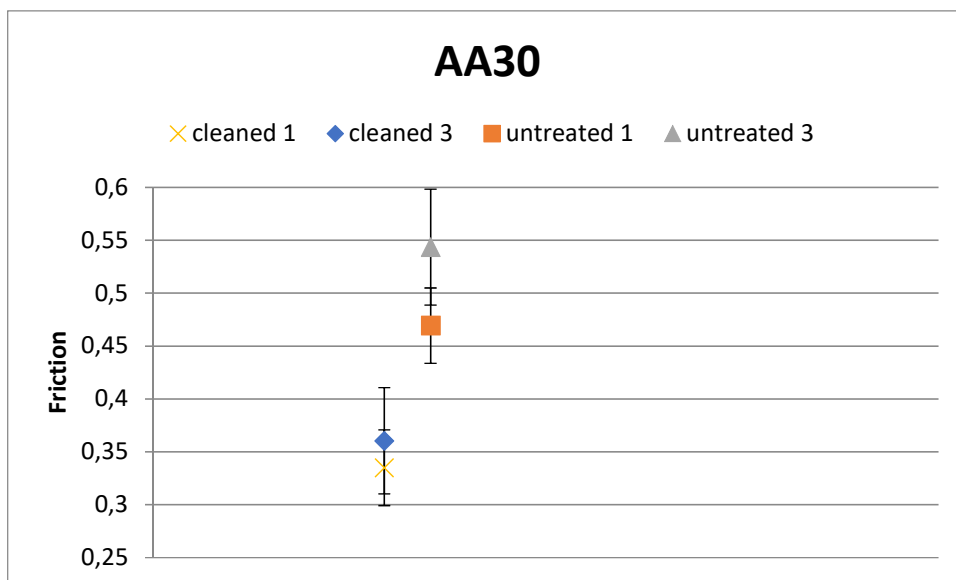


Figura 26 - AA30, comparação geral

Fonte: Pesquisa Direta (2019)

Neste gráfico, foi utilizado os valores médios do coeficiente de fricção de cada experimento, e foi adicionado o intervalo de confiança, então se torna claro, por causa das interseções, a falta de influência do uso prévio, e a grande influência da limpeza, no caso, observando a falta de interseção entre os testes limpos e os não tratados.

Medidas realizadas com o tipo FXM51-25 nas figuras 29 a 32:

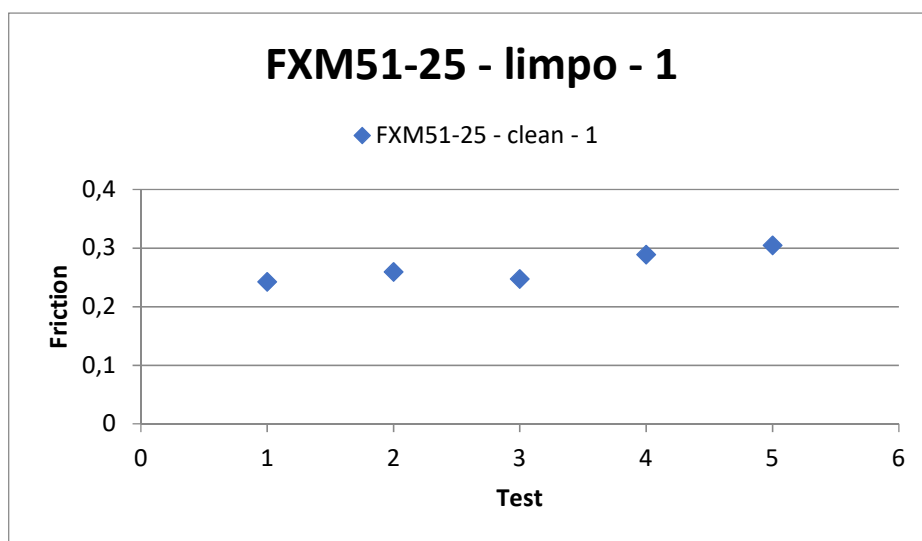


Figura 27 - Experimento 5, FXM51-25 – limpo – 1

Fonte: Pesquisa Direta (2019)

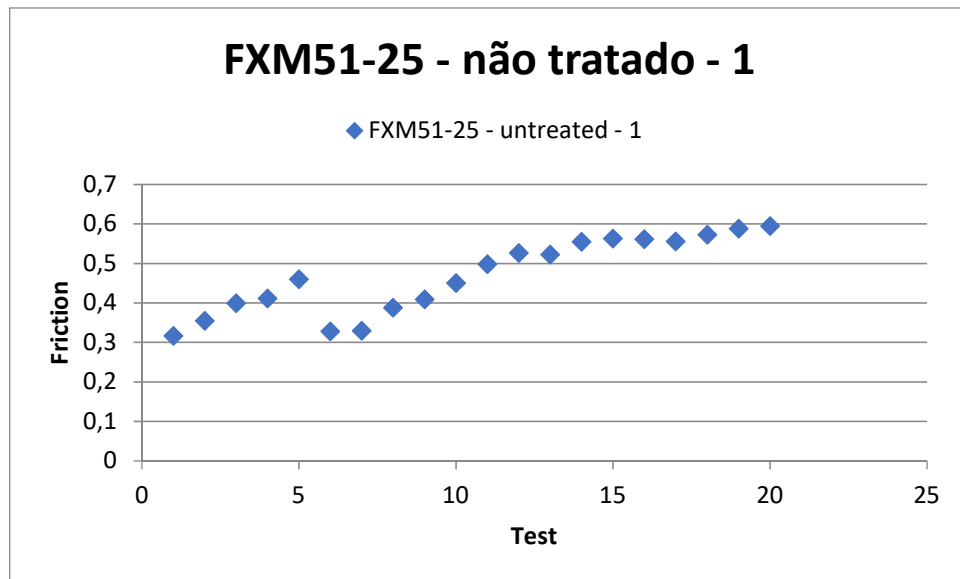


Figura 28 - Experimento 6, FXM51-25 – não tratado – 1
Fonte: Pesquisa Direta (2019)

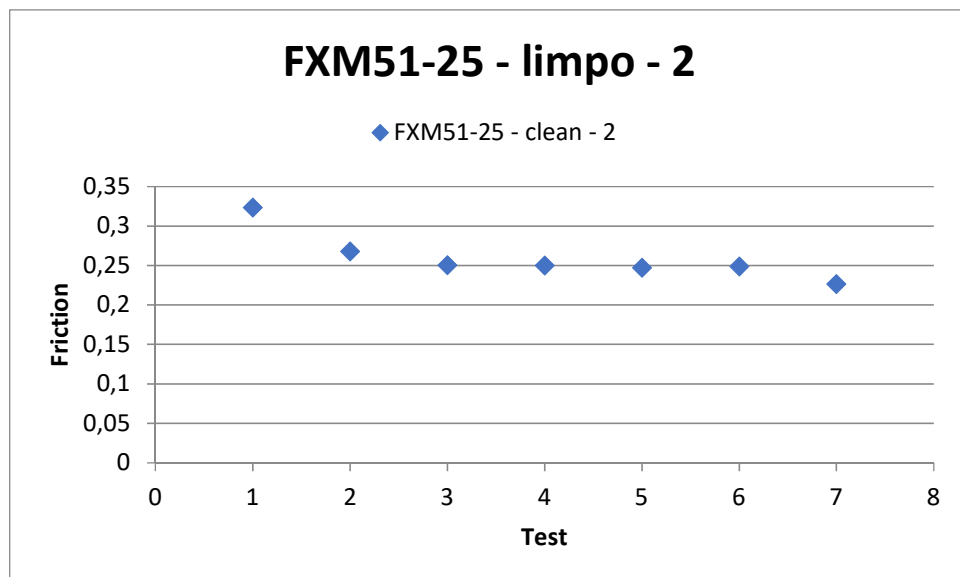


Figura 29 - Experimento 7, FXM51-25 – limpo – 2
Fonte: Pesquisa Direta (2019)

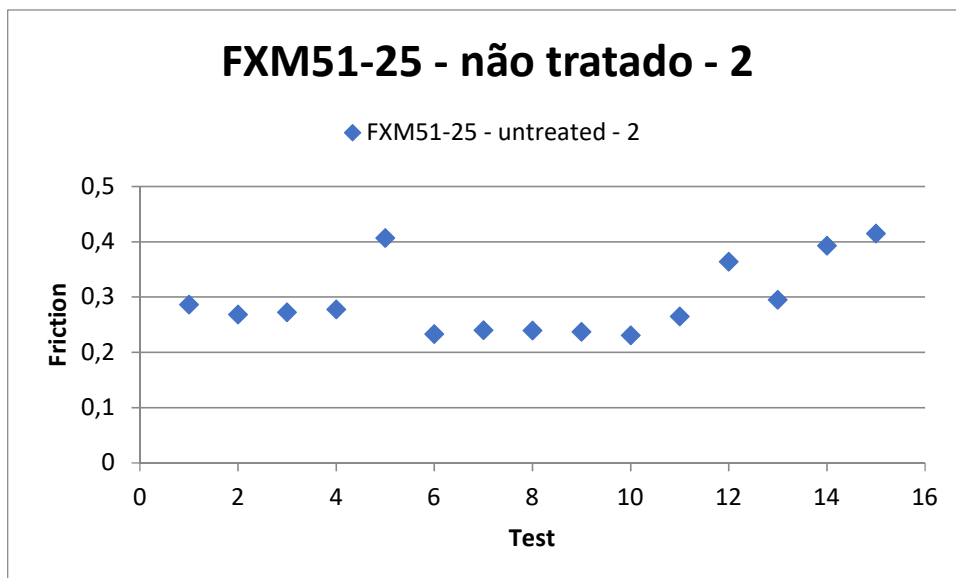


Figura 30 - Experimento 8, FXM51-25 – não tratado – 2

Fonte: Pesquisa Direta (2019)

Observações:

- Depois das medidas realizadas com o disco 1, foi notado um grande desgaste nos discos e nos colchetes, então os testes com o disco foram finalizados. E os colchetes precisaram ser remodelados, ficando novos e lisos novamente.

- Os testes lubrificados podem ter influenciado os testes finais com o disco 2 (experimentos 7 e 8). As medidas feitas após os testes lubrificados foram as duas últimas nos testes limpos (menores valores) e as últimas 10 nos testes não tratados (permaneceram constantes por alguns testes e então voltaram a aumentar os valores).

As figuras 33 e 34 mostram uma comparação dos experimentos realizados com os modelos FXM54-25 nas mesmas condições, mas com os corpos de prova diferentes.

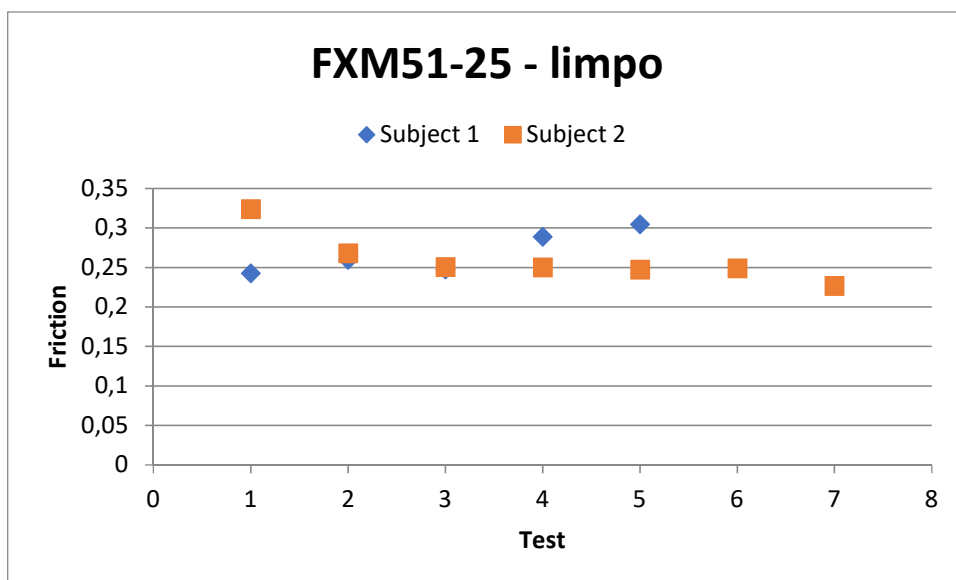


Figura 31 - FXM51-25 – limpo, comparação
Fonte: Pesquisa Direta (2019)

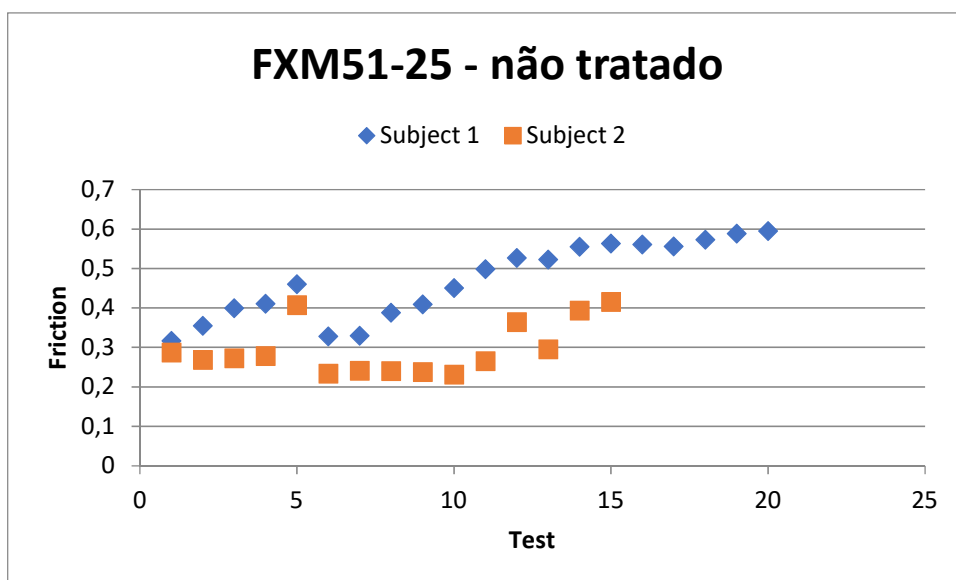


Figura 32 - FXM51-25 – não tratado, comparação
Fonte: Pesquisa Direta (2019)

Estes gráficos reforçam a ideia da influência da lubrificação e da remodelagem dos colchetes, pois é visível que o disco 2 apresenta um menor valor de coeficiente de fricção médio, mas no final dos testes não tratados, é notado uma curva ascendente dos valores do coeficiente de fricção, se aproximando dos valores do disco 1. Levando a acreditar que esses dois fatores são a explicação dos menores valores encontrados, e assim que esses fatores foram igualados, os valores do coeficiente de fricção também se igualaram, descartando a possibilidade de usar o fato do disco 2 não ter sido previamente utilizado.

A figura 35 mostra uma comparação entre os 4 experimentos realizados com o modelo FXM51-25

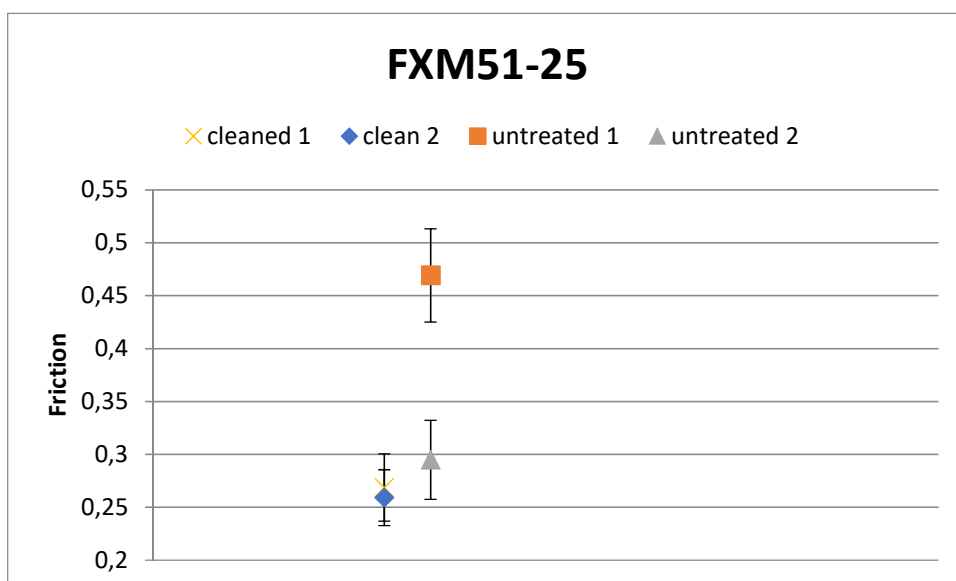


Figura 33 - FXM51-25, comparação geral
Fonte: Pesquisa Direta (2019)

Agora, se torna ainda mais claro a influência dos novos colchetes e dos testes lubrificados no experimento 8. É bem claro que os testes limpos são bem similares, mas essa grande diferença nos testes não tratados só pode ser associado a esses dois fatores mencionados ou a algum erro. Os resultados dos ensaios lubrificados são apresentados na figura 36.

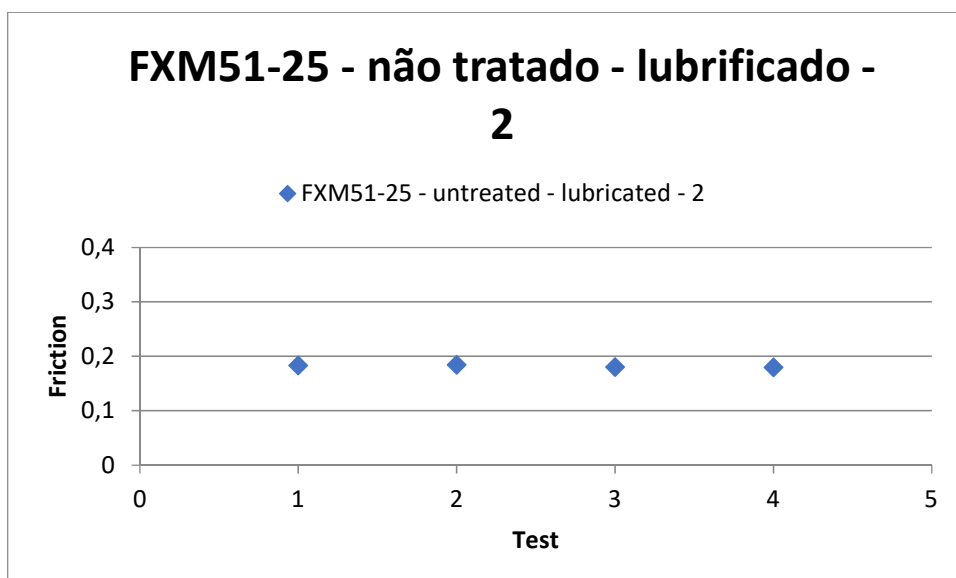


Figura 34 - Experimento 9. FXM51-25 – não tratado – lubrificado – 2
Fonte: Pesquisa Direta (2019)

Neste gráfico é apresentado o comportamento dos testes com os corpos de prova lubrificados. O fato mais interessante a ser destacado aqui é a constância no valor do coeficiente de fricção assim como seu baixo valor, ainda mais baixo que nos testes limpos.

Foi considerado a realização de novos testes de outro disco do tipo FXM51-25 para verificar as hipóteses levantadas sobre a diferença nos valores dos experimentos não tratados. Mas após uma análise posterior, também foi notado desgastes no disco 2 e nos novos colchetes, então essa opção foi descartada.

Algumas fotos desses desgastes são apresentadas agora nas figuras 37 a 39.



Figura 35 - Desgastes no disco 1
Fonte: Pesquisa Direta (2019)



Figura 36 - Desgastes no disco 2
Fonte: Pesquisa Direta (2019)



Figura 37 - Desgaste nos colchetes.
Fonte: Pesquisa Direta (2019)

Após os desgastes nos equipamentos e nos corpos de prova serem notados, os ensaios foram encerrados e o trabalho seguiu para a fase de análise dos resultados. Pois não se queria causar um dano maior aos objetos de estudo, e como uma grande quantidade de testes já haviam sido realizados, o espaço amostral foi considerado suficiente para o prosseguimento da pesquisa.

4.2 Considerações Finais

Na figura 40, é apresentada uma comparação dos valores do coeficiente de fricção médio de todos os experimentos. Exceto pelos experimentos 8 e 9, correspondente FXM51-25 não tratado 2, por causa dos baixos valores encontrados devido aos testes lubrificados, e os próprios testes lubrificados.

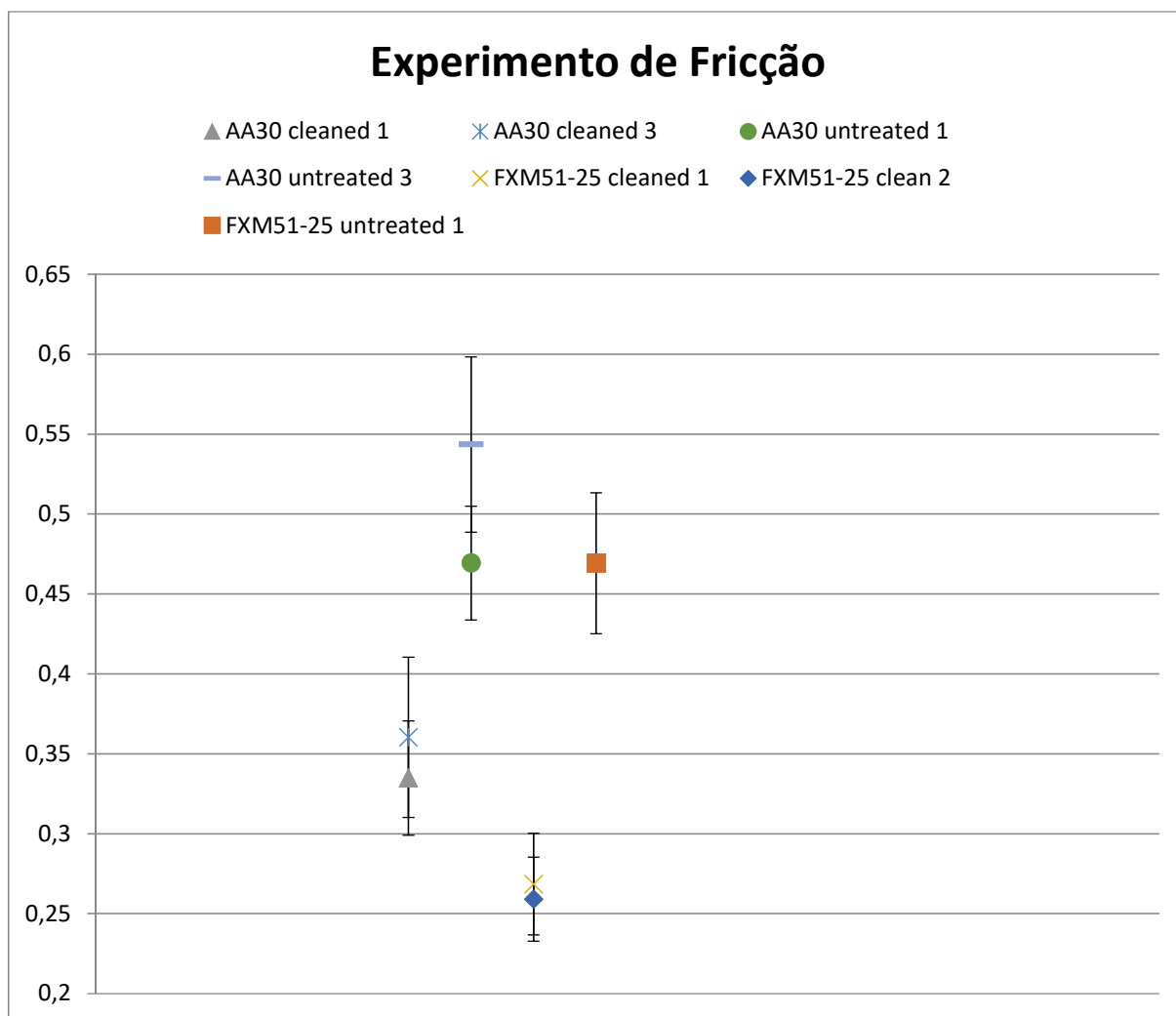


Figura 38 - Comparação dos valores do coeficiente de fricção médio de todos os experimentos.
Fonte: Pesquisa Direta (2019)

Analisando este gráfico final, fica evidente a semelhança de valores encontrados nos experimentos realizados em condições semelhantes, como pode ser visto nos valores mais altos para todos os experimentos não tratados, e nos valores mais baixos para os experimentos limpos. Apesar de parecer visualmente pelo gráfico que há uma grande diferença dos valores médios de coeficiente de fricção dos dois modelos utilizados em condições limpas, as diferenças nos valores absolutos não são tão grandes. E essa queda no valor médio pode ser atribuída às condições dos ensaios finais já previamente abordadas.

5 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

5.1 Conclusão

A questão problema apresentada por esse trabalho foi: **Como o tratamento de limpeza e lubrificação pode influenciar no coeficiente de atrito de discos de embreagem?** Assim, o trabalho foi desenvolvido na realização de uma pesquisa que respondesse essa problemática.

Com base na pesquisa bibliográfica realizada no decorrer deste trabalho, foi possível criar um embasamento teórico para poder realizar a análise dos estudos de caso.

Depois de todos os ensaios, e levando em consideração as observações feitas no último tópico, concluiu-se que não há influência do modelo do disco e nem se ele havia sido previamente utilizado, apenas se ele havia sido limpo ou não.

Pois o comportamento padrão de todos os testes limpos foi de um valor de coeficiente de atrito entre 0,25 e 0,4. Já no caso dos experimentos não tratados, esse valor fica entre 0,45 e 0,6, quando começa a estabilizar.

É importante frisar o baixo valor do coeficiente de fricção no experimento lubrificado, se mantendo constante em apenas 0,2. E deve-se recordar também que a realização deste experimento pode ter influenciado nos resultados do disco com que ele foi realizado, devido à resquícios de lubrificante nos colchetes e no próprio disco.

Foram feitas 98 medidas no total, o que é um espaço amostral considerável para que se possa confiar nos resultados encontrados. Devido a utilização de das ferramentas estatísticas desvio padrão e intervalo de confiança.

5.2 Recomendações

A finalidade deste trabalho foi criar uma base de dados para o comportamento do coeficiente de atrito dos corpos de utilizados, tendo sido possível observar suas variações considerando seu estado de tratamento. Contando com as informações coletadas, seria excelente agora uma realização de análises computacionais para uma comparação de resultados, que serviria para validar ambas as pesquisas e aprofundar o conhecimento sobre o assunto estudado neste trabalho.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- ANDERSON, B.S., 1991, “**Company perspective in vehicle tribology – Volvo**”, In 17th Leeds-Lion Symposium on Tribology, Elsevier Science Pub Co, 1991.
- ALI, A., SHAH, S., R., KHAN, M., **Dry Friction Clutch Disc of an Automobile under Transient Thermal Load: A Comparison of Friction Lining Materials**, MATEC Web of Conferences, 2017.
- ALYRIO, R.D. **Metodologia Científica**. PPGEN: UFRJ, 2008.
- BLAU, P., J., **Friction Science and Technology: from concepts to applications**. 2^a ed., CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 2009.
- BLOKHIN, A., BARAKHTANOV, L., KOSHURINA, A., TARATORKIN, A., LUBICHEV, P., **Research of the Friction Clutch Automatic Control Performance at the Stand**, International Conference on Electrical, Electronics and Mechatronics (ICEEM), 2015.
- BURWELL, J., T., **Survey of possible wear mechanisms**. *Wear*, 1^a ed., 1957.
- BUZZONI M., MUCCHI E., DALPIAZ, G., **A CWT-based methodology for piston slap experimental characterization**. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017.
- DEARNLEY, P., A., ALDRICH-SMITH, G., **Corrosion-Wear Mechanisms of Hard Coated Austenitic 316L Stainless Steels**, *Wear*, Vol. 256, 2004.
- DOWSON, D., **History of Tribology**, 2^a ed., Professional Engineering Publishing, London, UK, 1998.
- FANG, C., XIANGHUI, M., YUBAI, X., **A piston tribodynamic model with deterministic consideration of skirt surface grooves**. *Tribology International*, 2017.
- GARCIA, I., DREES, D., CELIS, J., P., **Corrosion-Wear of Passivating Materials in Sliding Contacts Based on a Concept of Active Wear Track Area**, *Wear*, Vol. 249, 2001.
- GARBAR, I., I., SKORININ, J., V., **Metal Surface Layer Structure Formation under Sliding Friction**, *Wear*, Vol. 51, 1978.
- GREGORI, I., MARTINS, C., THOMAZ, C., **Multivariate judder behavior analysis of dry clutches based on torque signal and friction material**, SAE Congress, USA, 2014.
- HALLING, J., **Principles of Tribology**, 2^a ed., The Macmillan Press Ltd., London, UK, 1978.
- HOLMBERG, K., MATTHEWS, A., **Coatings Tribology, Properties, Mechanisms, Techniques and Applications in Surface Engineering**, 2^a ed., Elsevier, Oxford, UK, 2009.
- HOLMBERG, K., **Tribology in the past and in the future**. In: **Tribology of Mechanical Systems: A Guide to Present and Future Technologies**. Vizintin, J., Kalin, M., Dohda, K., Jahanmir, S. (eds), ASME Press, New York, USA, 2004.

- HOLMES, D., R., PASCOE, R., T., **Strain Oxidation Interaction in Steels and Model Alloys**, Werkstoff und Korrosion, Vol. 23, 1972.
- HUTCHINGS, I., M., **Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials**, 1^a ed., Hodder Headline PLC, London, UK, 1992.
- JOST, H.P., 1960, “**Lubrication (tribology) education and research**, Jost Rep., Department of Education and Science, HMSO, London, 1966.
- JOST, H. P., “**Tribology-origin and future**”, Wear, v.136, pp.1-17, 1990.
- KARIMI, A., AVELLAN, F., **Comparison of Erosion Mechanisms in Different Types of Cavitation**, Wear, Vol. 113, 1986.
- KRAGELSKII. I., V., **Friction and Wear**. Butterworths, London, 1965.
- LAKATOS, E.M.; MARCONI, M.A., **Fundamentos de metodologia científica**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2006.
- LANDOLT, D., MISCHLER, S., **Tribocorrosion of Passive Metals and Coatings**, Woodhead Publishing Ltd, 2011.
- LUDEMA, K., C., **Friction, Wear, Lubrication: A Textbook in Tribology**, 1^a ed., CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 1996.
- LUDEMA, K., C., **History of tribology and its industrial significance**. In: **Fundamentals of Tribology and Bridging the Gap Between the Macro- and Micro/Nanoscales**. Bhushan, B. (ed.) NATO Science Series; II. Mathematics, Physics and Chemistry – Vol. 10, Kluwer Academic Publishers, London, UK, 2001.
- NARAYAN, S., GRUJIC, I., STOJANOVIC, N., **Design and Analysis of an Automotive Single Plate Clutch**, Mobility and Vehicle Mechanics, Vol 44, No. 1, 2018.
- PERSSON, B., N., J., **Sliding Friction: Physical Principles and Applications**, 2nd Ed., Springer-Verlag, Berlin, 2000.
- PREECE, C., R., BRUNTON, J., H., **A Comparison of Liquid Impact Erosion and Cavitation Erosion**, Wear, Vol. 60, 1980.
- RENGSTORFF, G., W., MIYOSHI, K., BUCKLEY, D., H., **Interaction of Sulfuric Acid Corrosion and Mechanical Wear of Iron**, ASLE Transactions, Vol. 29, 1986.
- RIGNEY, D., A., HIRTH J., P., **Plastic Deformation and Sliding Friction of Metals, Wear**, Vol. 53, 1979.
- SALEH, S., B., BHEMANNA, G., RAO, P., S., **Design and Analysis of Clutches for Motors and Machinery by using different materials**, International Journal of Innvative Research in Technology, 2017.

SCOOT, D., JONES, M., H., **Industrial Tribology: The Practical Aspects of Friction, Lubrication and Wear**, 2^a ed, Elsevier Science Publishing Company, New York, USA, 1992.

SHARP, R., B., **Plant Silica: An Abrasive Constituent of Plant Matter**, J. Agricultural Engineering Research, Vol. 7, 1962.

SHAVER, Ray; SHAVER, F. **Manual transmission clutch systems**. Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers, 1997.

SODA, N., KIMURA, Y., TANAKA, A., **Wear of Some F.C.C. Metals during Unlubricated Sliding Part I: Effects of Load, Velocity and Atmospheric Pressure**, Wear, Vol. 33, 1975.

STACHOWIAK, G.W., BATCHELOR, A.W., **Engineering Tribology**, 4^a ed., Elsevier, Oxford, UK, 2014.

SWAIN, M., V., **Microscopic Observations of Abrasive Wear of Polycrystalline Alumina**, Wear, Vol. 35, 1975.

TRERTHEWEY, K., R., HALEY, T., J., CLARK, C., C., **Effect of Ultrasonically Induced Cavitation on Corrosion Behaviour of a Copper-Manganese-Aluminium Alloy**, British Journal of Corrosion, Vol. 23, 1988.

ZHAO, B., CUI, Y., XIE, Y., ZHOU K., **Dynamics and lubrication analyses of a planar multibody system with multiple lubricated joints**. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2017.

Certifico que o aluno VITOR FONSECA RAMOS, autor do trabalho de conclusão de curso intitulado "ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA LIMPEZA E LUBRIFICAÇÃO NO COEFICIENTE DE ATRITO DE DISCOS DE EMBREAGEM", efetuou as correções sugeridas pela banca examinadora e que estou de acordo com a versão final do trabalho.

Ouro Preto, 10 de julho de 2019.



Prof. Sávio Sade Tayer

Orientador