

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA**  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**Moisés Bulhões da Silva**

**Estudo sobre ensaios tribológicos**

**Juiz de Fora**  
**2020**

**Moisés Bulhões da Silva**

**Estudo sobre ensaios tribológicos**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Colegiado de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Moisés Luiz Lagares Júnior.

**Juiz de Fora**

**2020**

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca  
Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Silva, Moisés Bulhões.

Estudo sobre ensaios tribológicos / Moisés Bulhões Silva. –  
2020.

36 p.

Orientador: Moisés Luiz Lagares Júnior Trabalho de Conclusão de Curso  
(graduação) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de  
Engenharia, 2020.

1. Tribologia . 2. Atrito . 3. Ensaios tribológicos . I. Júnior , Moisés Luiz  
Lagares , orient. II. Título.

**Moisés Bulhões da Silva**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Colegiado de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Aprovada em 27/11/20

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Moisés Luiz Lagares Júnior - Orientador  
Universidade Federal de Juiz de Fora

---

Prof. Dr. Carlos Renato Pagotto  
Universidade Federal de Juiz de Fora

---

Prof. Dr. Raphael Fortes Marcomini  
Universidade Federal de Juiz de Fora

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho primeiramente à Deus, por ter me abençoado com toda sabedoria, saúde e paciência. Dedico também aos meus pais, Neide e Cosme, aos meus tios Amauri e Lúcia, aos meus irmãos Marcos e Michele, à minha noiva Ana Maria. Aos meus grandes amigos que conquistei durante todos estes anos na universidade e que certamente irão fazer parte de toda a minha vida, Daniel, Max, Matheus e Paulo Victor.

## **AGRADECIMENTOS**

À minha família por ter me incentivado e apoiado durante toda essa jornada, dando sempre o suporte necessário.

Aos meus amigos que sempre estiveram do meu lado.

Ao meu orientador Moisés, pelo apoio para a realização deste trabalho.

Ao meu coorientador Luiz, pelo suporte prestado.

## RESUMO

Os desgastes nos equipamentos mecânicos sempre foram um fator de grande estudo dentre os engenheiros e cientistas da área. Dessa forma, profissionais da área vem se voltando para este assunto e estudando maneiras de minimizar os malefícios causados por desgaste prematuros dos equipamentos e também estudando um melhor acompanhamento destes desgastes. Assim, existe a necessidade de mensurarmos de forma quantitativa essa perda de material dos componentes mecânicos. O estudo das características do tribômetros roda sobre disco foi desenvolvido neste trabalho a fim de determinar fatores primordiais para o entendimento do funcionamento e importância deste equipamento em ensaios e testes de desgastes ligados à tribologia.

Palavras-chave: Desgaste. Atrito. Trilho Ferroviário. Superfície de contato. Tribômetro.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Esquema da situação de contato.....	17
Figura 2 – Área aparente e área real.....	18
Figura 3 – Distribuição da tensão de contato.....	19
Figura 4 – Mecanismo de desgaste contato à seco.....	19
Figura 5 – Mecanismo de desgaste com filmes químicos.....	20
Figura 6 – Mecanismo de desgaste com sólidos lameres.....	20
Figura 7 – Mecanismo de desgaste com lubrificação fluídica.....	20
Figura 8 – Mecanismo de desgaste com elastômeros.....	20
Figura 9 – Mecanismo de desgaste com elementos rolantes.....	20
Figura 10 – Mecanismo de desgaste com campos magnéticos.....	20
Figura 11 – Desgaste abrasivo de dois corpos.....	21
Figura 12 – Desgaste abrasivo de três corpos.....	21
Figura 13 – Mecanismos de desgaste por erosão.....	22
Figura 14 – Processo de desgaste por corrosão.....	23
Figura 15 – Ensaio de disco de borracha com areia.....	24
Figura 16 – Ensaio de erosão de partículas sólidas.....	24
Figura 17 – Ensaio de erosão por cavitação.....	25
Figura 18 – Ensaio de desgaste de quatro esferas.....	26
Figura 19 – Ensaio de desgaste bloco-disco.....	26
Figura 20 – Ensaio de desgaste pino-disco.....	27
Figura 21 – Tribômetro padrão.....	28
Figura 22 – Sistema aplicador de cargas do tribômetro.....	29
Figura 23 – Componentes do tribômetro padrão.....	30
Figura 24 – Projeto do tribômetro isométrica.....	32
Figura 25 – Projeto do tribômetro roda sobre disco vista lateral.....	33
Figura 26 – Tribômetro roda sobre disco.....	34
Figura 27 – Contato entre o corpo de prova(roda) e o disco.....	35
Figura 28 – Vista superior do tribômetro .....	35



## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Características do equipamento.....	28
--	----

## SUMÁRIO

1	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	13
1.1	APRESENTAÇÃO.....	13
1.2	FORMULAÇÃO DO PROBLEMA.....	14
1.3	OBJETIVOS.....	14
1.3.1	<b>Objetivo geral</b> .....	14
1.3.2	<b>Objetivo específico</b> .....	14
1.4	JUSTIFICATIVA.....	14
2	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	15
2.1	ATRITO.....	15
2.2	DESGASTE.....	15
2.3	ASPECTOS ECONÔMICOS.....	15
2.4	SISTEMA TRIBOLÓGICO.....	16
2.5	O TERCEIRO CORPO.....	17
2.6	CONTATO ENTRE SUPERFÍCIES RUGOSAS.....	17
2.7	MECANISMO DE DESGASTE.....	19
2.7.1	<b>Desgaste corrosivo</b> .....	21
2.7.2	<b>Desgaste erosivo</b> .....	21
2.7.3	<b>Desgaste por corrosão</b> .....	22
2.7.4	<b>Desgaste por cavitação</b> .....	23
2.8	ENSAIOS DE DESGASTE.....	23
2.8.1	<b>Ensaio de disco de borracha com areia</b> .....	24
2.8.2	<b>Ensaio de erosão com partículas sólidas</b> .....	24
2.8.3	<b>Ensaio de erosão por cavitação</b> .....	25
2.8.4	<b>Ensaio de desgaste de quatro esferas</b> .....	25
2.8.5	<b>Ensaio de desgaste bloco-disco</b> .....	26
2.8.6	<b>Ensaio de desgaste pino-disco</b> .....	27
2.9	TIPO DE TRIBÔMETRO.....	28
2.9.1	<b>Tribômetro padrão</b> .....	28

3	<b>METODOLOGIA</b> .....	31
2.8	INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA.....	31
2.8	INFLUÊNCIA DO COEFICIENTE DE ATRITO.....	31
2.8	INFLUÊNCIA DA DUREZA DOS MATERIAIS.....	32
2.8	INFLUÊNCIA DA CARGA NOMINAL.....	32
4	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	34
5	<b>CONCLUSÃO</b> .....	36
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	37

# 1- INTRODUÇÃO

## 1.1- Apresentação

As utilizações de componentes mecânicos trazem consigo um fenômeno natural que é o desgaste. Muitos destes desgastes podem ser minimizados com a utilização de lubrificantes que minimizam o atrito entre as superfícies dos corpos, gerando assim um melhor funcionamento do conjunto contribuindo para uma vida útil maior.

Dessa forma, a necessidade de análise do desgaste se fez necessária para que as manutenções destes equipamentos fossem realizadas efetivamente. Com isso, diversos engenheiros e profissionais da área desenvolveram diversos projetos que auxiliaram na análise quantitativa e qualitativa da degradação das superfícies dos corpos.

A manutenção preventiva tem grande influência sobre a necessidade do projeto deste tipo de equipamento, pois a partir dela, se é capaz de acompanhar os desgastes e ter uma melhor gestão e análise das falhas.

Uma análise feita de forma correta diminui a incidência dessas falhas, fazendo com que se aumente a produtividade e a disponibilidade das máquinas e de seus periféricos. Assim diversos tipos de tribômetro foram projetados, cada um com uma determinada característica para uma análise específica.

## 1.2- Formulação do problema

Existem diversos tipos de tribômetro desenvolvido por diversos estudiosos de tribologia e de projetos de máquinas. Estes diferentes tipos são suficientes para estudarem a taxa de desgaste e outros fenômenos ocorrentes em um ensaio de contato entre superfícies, entretanto, apesar da diversidade de tipos de tribômetro, estes já existentes, não caracterizam o que realmente acontece nos contatos entre as superfícies.

## 1.3- Objetivos

### 1.3.1- Objetivo Geral

Temos como objetivo o estudo da tribologia em si, juntamente com a caracterização de um tribômetro capaz de analisar o desgaste do contato entre dois corpos em contato entre si.

### 1.3.2- Objetivo Específico

O nosso principal objetivo é o estudo das características de projeto de um tribômetro que possua atributos específicos que o diferencie dos demais existentes, sendo que o estudo proposto tem por finalidade assegurar ao protótipo a fidelidade do desgaste que ocorre no sistema real.

## 1.4- Justificativa

Devido à grande diversidade de projetos existentes, sempre existe peculiaridades em cada tipo de equipamento, logo, dependendo do tipo de sistema, alguns apresentam melhor viabilidade que outros. Dessa forma, o projeto estudado se mostra mais adequado ao sistema roda-trilho.

## 2- FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1- Atrito

Define-se atrito como a força resistente tangencial à fronteira comum entre os corpos quando, sob a ação de uma força externa, um corpo se move ou tende a se mover relativamente à superfície do outro[Erikson e Jacobson,2002].

Assim, o atrito é a dissipação de energia na interface de deslizamento.

### 2.2- Desgaste

Denomina-se desgaste à perda progressiva de substância da superfície de um corpo sólido, causado por ação mecânica, isto é, por contato e movimento relativo de um contra corpo sólido, líquido ou gasoso[Erikson e Jacobson,2002].

A ação na superfície de um corpo sólido por contato e movimento relativo de um contra corpo sólido, líquido ou gasoso é denominada “ação tribológica”. O desgaste resulta em pequenas partículas soltas (partículas de desgaste) e em modificações no material e na geometria da camada de superfície solicitada tribologicamente. Normalmente, o desgaste é indesejável e prejudicial[Osterle e Urban,2006].

Os processo de fabricação não são considerados como desgaste em relação à peça trabalhada, apesar de ocorrer processo tribológico na interface entre a peça trabalhada e a ferramenta, tal como ocorre em desgaste[Osterle e Urban,2006].

### 2.3- Aspectos econômicos

O desgaste de componentes e equipamentos em inúmeros segmentos industriais, agrícolas e em outras atividades econômicas, representa um dos maiores fatores de depreciação de capital e de fonte de despesas com manutenção. Em torno de 10% de toda a energia gerada por meios técnicos, é dissipada por fricção e outros processos de desgaste.

Estatísticas mostram que, nos países desenvolvidos, 1 a 5% do Produto Interno Bruto é gasto direta ou indiretamente pela ação destruidora do desgaste. Tem sido ressaltada a necessidade e importância de mais estudos fundamentais, para uma melhor compreensão do desgaste, sendo impossível preveni-lo, mas sim minimizá-lo. A taxa de desgaste depende das condições de trabalho, carregamento, lubrificação e meio ambiente. Dentre as diversas formas de ocorrência, o desgaste abrasivo tem sido considerado como o responsável por mais de 50% dos problemas industriais envolvendo desgaste. Todas as interações tribológicas estão combinadas com perda de material e perda de eficiência[Erikson e Jacobson,2002].

O desgaste influi, sobre os custos de produção, de duas maneiras:

- Diretamente – devido às necessidades de reposição ou recuperação de peças desgastadas.
- Indiretamente – devido às necessidades de superdimensionamento de componentes, limitações na produção por causa de equipamentos deteriorados, além de interrupções muitas vezes imprevistas de linhas de produção. Para se otimizar o comportamento ao desgaste dos materiais, é necessário conhecer os mecanismos de desgaste e seleção de materiais apropriados [Osterle e Urban, 2006].

#### 2.4- Sistema Tribológico

O fenômeno desgaste é influenciado por um conjunto de outros fatores não inerentes ao material como: as características do abrasivo e do ambiente, a intensidade e a natureza dos esforços, assim como a variação temporal destas características [Erikson e Jacobson, 2002].

Um tribossistema ou sistema tribológico genérico consiste em duas superfícies com movimento relativo (corpo e contra corpo), um meio entre estas duas superfícies e o meio ambiente. Existem quatro formas elementares de movimento em sistemas tribológicos: deslizamento, laminação, impacto e fluxo (escoamento). Parâmetros operacionais físico-técnico durante um processo de desgaste, são definidos por quatro variáveis:

- Força normal
- Velocidade
- Temperatura
- Duração do processo

As modalidades de movimento que ocorrem durante o processo de desgaste podem ser classificadas em quatro, ou na combinação entre elas:

- deslizamento;
- rolamento;
- impacto;
- fluência;

Elas podem ser contínuas ou variar com o tempo. Nos casos de movimento de rolamento com superposição de componentes macroscópicos de deslizamento (macro deslizamento), utiliza-se o termo rolamento com escorregamento. Nos casos de movimento rotativo, os elementos de superfície em contato se movem a velocidades relativas diferentes.

## 2.5- O terceiro corpo

Segundo Fillot, 2007, o conceito de terceiro corpo foi introduzido por Godet em 1970 para identificar a interface entre dois sólidos postos em contato.

Esse meio, também conhecido como filme ou camada de fricção, pode ser injetado artificialmente, como no caso dos óleos e outros tipos de lubrificantes ou, no caso de superfícies secas, pode ser o resultado do arrancamento das superfícies atritadas [Fillot,2007].

O efeito de arrancamento é causado pelos chamados “platôs” de contato das superfícies em atrito. De acordo com Erikson e Jacobson,2002, os platôs primários (mais resistentes), desgastam a parte mais macia do disco e as fragmentam. Esses fragmentos, circulam livremente entre os dois materiais atritados, dando origem à uma camada de fricção(filme). A figura 01 mostra esquematicamente a situação de contato, onde podem ser vistos os platôs junto dos fragmentos que circulam na interface e dão origem ao filme.

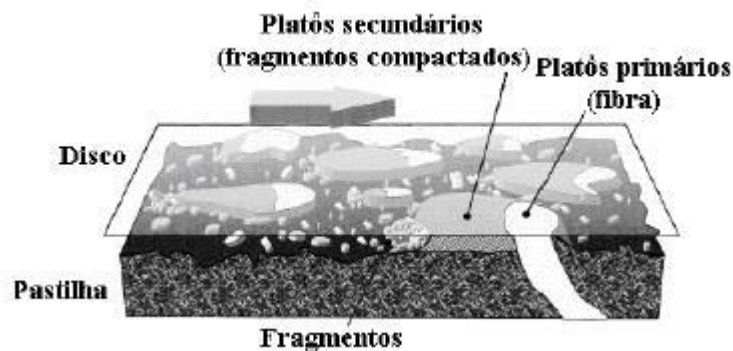


Figura 01: Esquema da situação de contato

Conforme Godet 1984, o terceiro corpo tem por função suportar a carga, participar na acomodação da velocidade e separar as superfícies em contato, evitando interações diretas. Além disso, o filme de fricção é importante não somente para a estabilização do atrito e minimização do desgaste, mas também, desempenha um papel importante na prevenção de ruído vibração [Osterle e Urban,2006]. Segundo esse mesmo estudo o filme pode ser observado em ambas as superfícies atritadas.

## 2.6- Contato entre superfícies rugosas

Quando duas superfícies são pressionadas, o contato ocorre, inicialmente, em poucos pontos, nos picos das asperezas mais altas. Com o aumento da pressão, mais asperezas vão progressivamente entrando em contato e as mais altas vão se deformando, permitindo o contato das menores. A área real de contato é, em geral, muito menos que a área aparente.



Para efeito de análise, o contato entre duas superfícies rugosas é usualmente modelado como o contato entre uma superfície supostamente lisa, rígida e plana e uma outra com rugosidade igual à rugosidade combinada das duas superfícies originais.

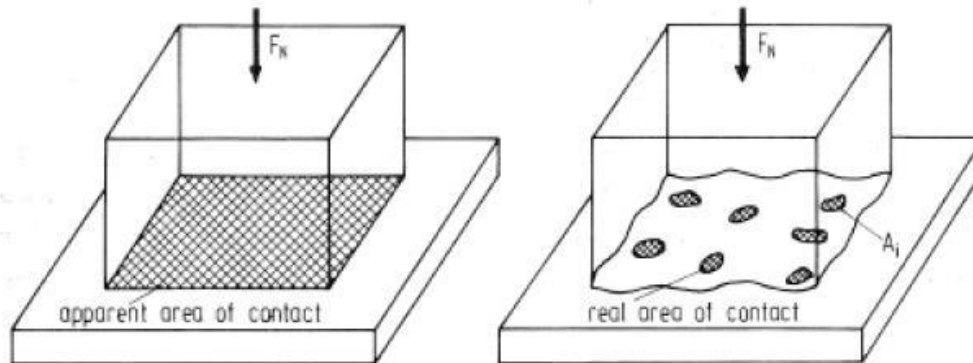


Figura 02: Área aparente e área real.

As asperezas individuais são bastante suaves. Inclinações maiores que dez graus são bastante raras e a maioria das asperezas têm inclinações muito menor (HUTCHINGS.,1992). Estudando o comportamento de asperezas individuais, é conveniente modelá-las como protuberâncias perfeitamente lisas, de formato esférico. Quando uma esfera de um material elástico é pressionada contra um plano com uma carga normal  $W$ , o contato entre os dois corpos se dará numa área circular de raio  $a$  [m], dado pela equação de Hertz (1881).

$$a = \left( \frac{3 \cdot W \cdot r}{4 \cdot E'} \right)^{1/3}$$

Equação 01: Contato de Hertz

Onde  $W$ : é a carga normal [N]

$r$ : raio da esfera [m]

$E'$ : módulo de elasticidade [Mpa]

A área de contato plástica depende de cos módulos de elasticidade  $E_1$  e  $E_2$  e dos coeficientes de poisson  $\nu_1$  e  $\nu_2$ , para os materiais da esfera e do plano.

$$\frac{1}{E} = \frac{(1-\nu_1^2)}{E_1} + \frac{(1-\nu_2^2)}{E_2}$$

Equação 02: Determinação do módulo de elasticidade.

A área de contato entre a esfera e o plano,  $\pi a^2$ , é dada por:

$$a^2 \pi = 0,83 \pi \left( \frac{W \cdot r}{E} \right)^{2/3}$$

Equação 03: Área de contato esfera/plano.

Para deformação puramente elástica:

A área de contato é proporcional à  $W^{2/3}$ ;

A pressão média  $P_m = \frac{W}{\pi a^2}$ , com  $W^{1/3}$ ;

A tensão não é uniforme sobre a área de contato circular, apresenta um máximo no centro e cai a zero nas extremidades.

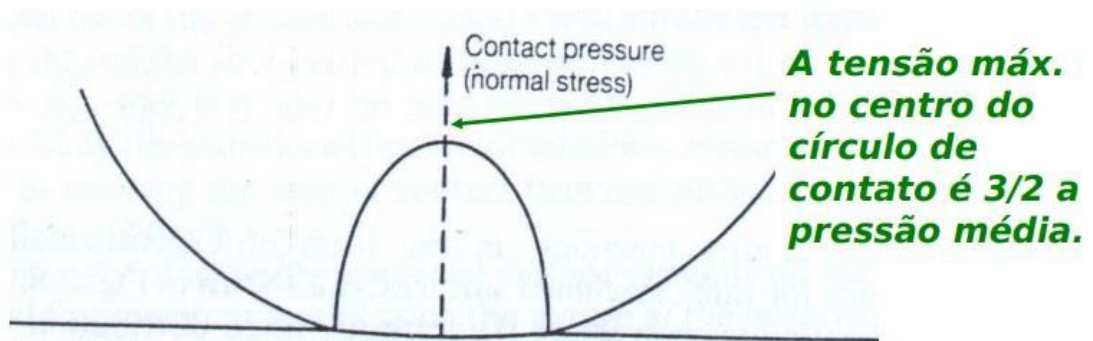


Figura 03: Distribuição da tensão de contato.

## 2.7- Mecanismo de desgaste

As formas de desgastes mais comuns são o desgaste abrasivo, desgaste erosivo, desgaste corrosivo e a cavitação. Desgastes abrasivos e erosivos são formas de desgastes causadas entre partículas e material sólido, ocasionando a perda de material devido à passagem de partículas duras sobre a superfície. A cavitação é o impacto localizado dos fluidos em regime turbulento em uma superfície. O grande desafio dos projetistas é prever os pontos aonde estes diferentes tipos de desgaste podem ocorrer, e selecionar os materiais apropriados para a redução dos efeitos de desgaste (STACHOWIAK, 2001). As figuras 04 à 10 mostram as soluções tribológicas mais utilizadas na engenharia.

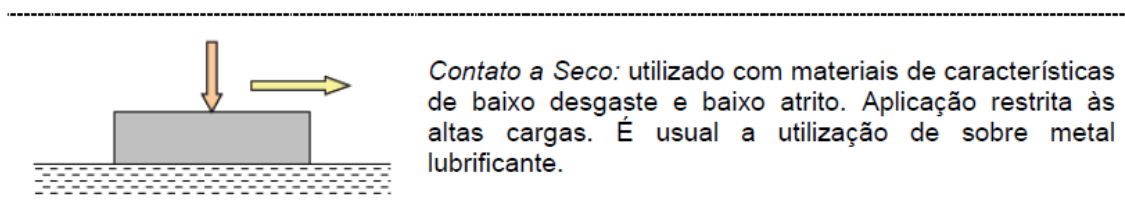
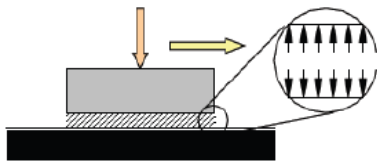
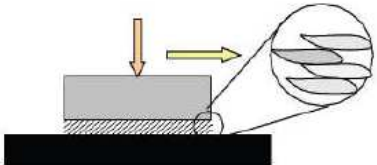


Figura 04: Mecanismo de desgaste contato à seco.



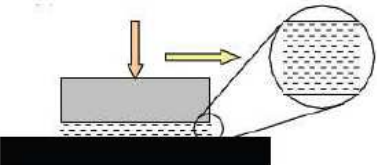
*Filmes Químicos:* utilizado para proteger as superfícies sujeitas ao cisalhamento. É de extrema importância a manutenção da temperatura do filme, mantendo suas propriedades lubrificantes.

Figura 05: Mecanismo de desgaste com filmes químicos.



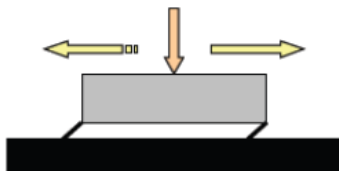
*Sólidos Lamelares:* sólidos de baixa resistência ao cisalhamento são utilizados para proteger as superfícies dos materiais, como grafite e dissulfeto de molibdênio.

Figura 06: Mecanismo de desgaste com sólidos lamelares.



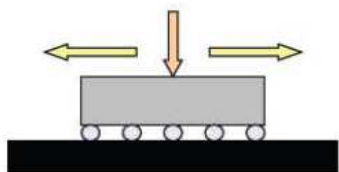
*Lubrificação Fluidica:* fluidos contínuos separam as superfícies com movimento relativo evitando o cisalhamento. O fluido mais utilizado nesta aplicação é o ar, mas também pode-se encontrar vapor ou líquido.

Figura 07: Mecanismo de desgaste com lubrificação fluidica.



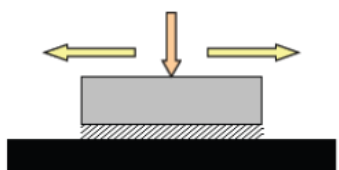
*Elastômeros:* as superfícies podem ser separadas por elastômeros. Limita-se a aplicações com deslocamento relativo de pequena amplitude.

Figura 08: Mecanismo de desgaste com elastômeros.



*Elementos Rolantes:* mancais de elementos rolantes e rolamentos são as soluções tribológicas mais difundidas na indústria. Apesar da complexa solução matemática, os fabricantes simplificam suas aplicações, dispondo modelos padronizados e soluções prontas para o uso.

Figura 09: Mecanismo de desgaste com elementos rolantes.



*Campos Magnéticos:* o princípio de atração e repulsão entre os pólos magnéticos possibilita o suporte de cargas sem contato mecânico. Não há geração de calor por atrito, entretanto correntes parasitas geram calor nos mancais, exigindo refrigeração.

Figura 10: Mecanismo de desgaste com campos magnéticos.

### 2.7.1- Desgaste corrosivo

O desgaste corrosivo é causado por partículas abrasivas aderidas ao material ou presentes entre duas superfícies. A proporção do desgaste depende muito de aspectos como tamanho, dureza, pressão de contato e velocidade das partículas (BAYER, 2004). As Figuras 11 e 12 ilustram a diferença entre o desgaste de dois corpos, quando a partícula está aderida a uma das superfícies, e de três corpos, quando a partícula está livre entre as superfícies cisalhantes.

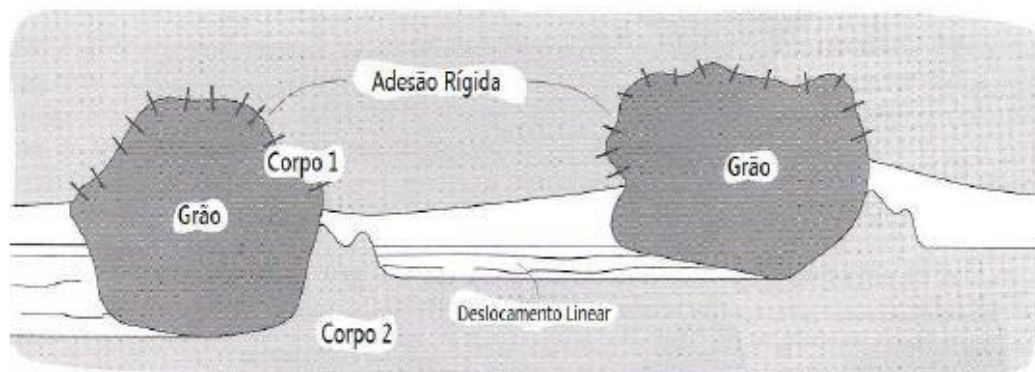


Figura 11: Desgaste abrasivo de dois corpos.

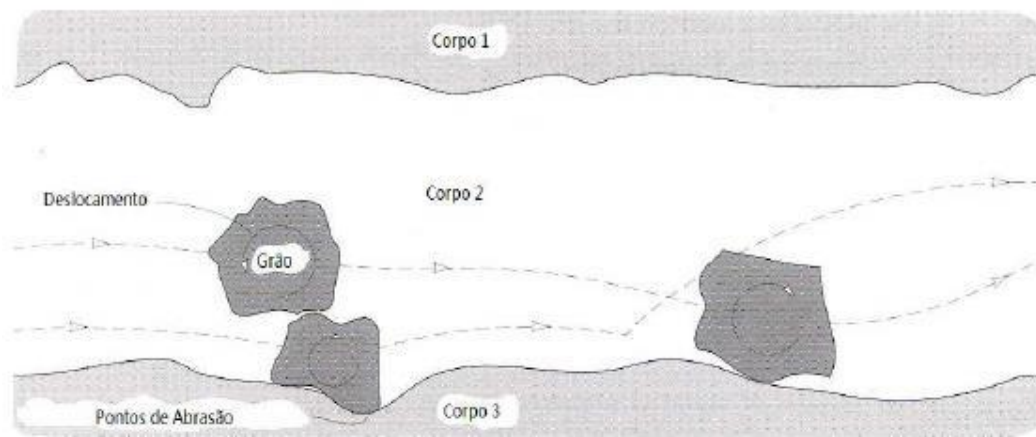


Figura 12: Desgaste abrasivo de três corpos.

### 2.7.2- Desgaste Erosivo

No desgaste erosivo, as partículas não são pressionadas contra a superfície como no desgaste abrasivo, mas sofrem choque mecânico contra as superfícies. Os principais parâmetros deste fenômeno são o ângulo de incidência da partícula na superfície do material, a velocidade da partícula, o tamanho da partícula e a dureza da superfície (BAYER, 2004). Alguns dos possíveis mecanismos de erosão podem ser vistos na Figura 13.

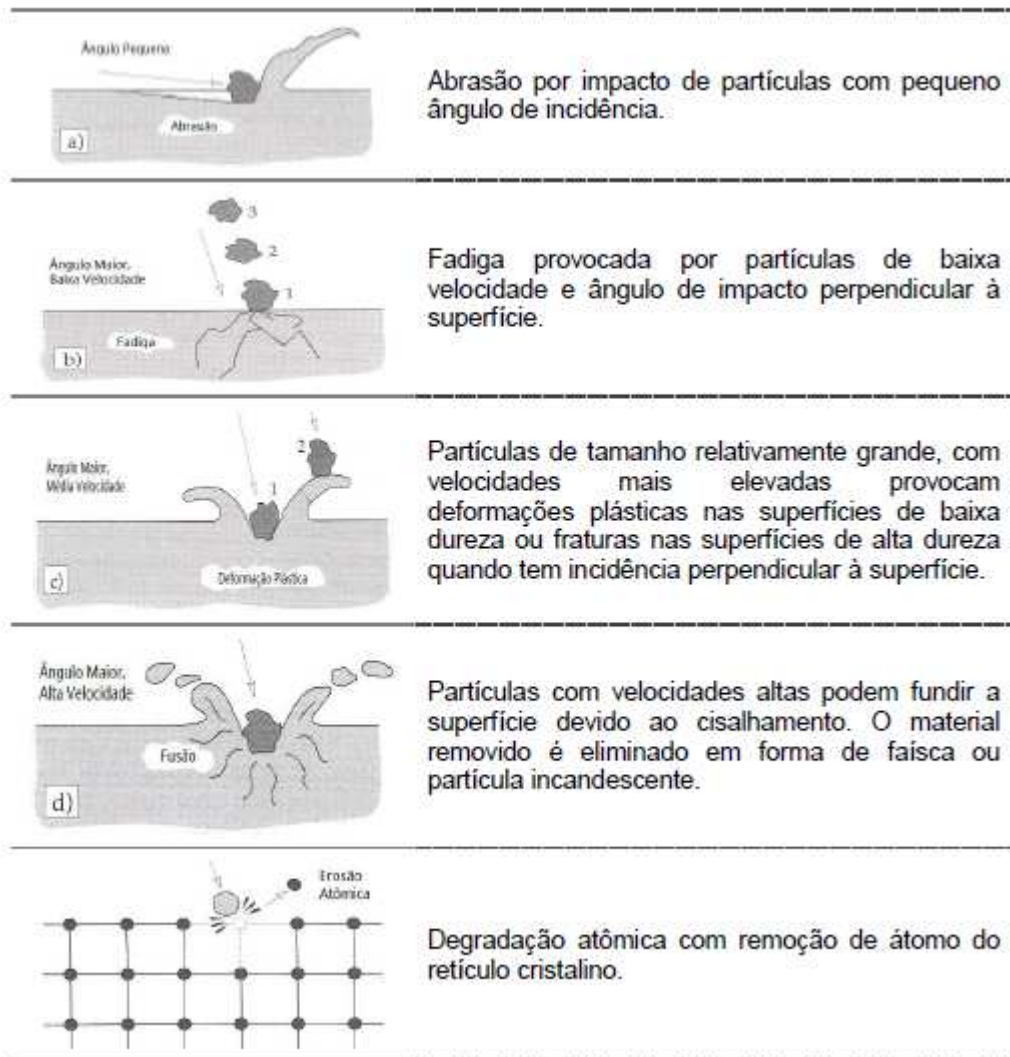


Figura 13: Mecanismos de desgaste por erosão.

### 2.7.3- Desgaste por corrosão

O desgaste corrosivo acontece quando a superfície do material reage com o meio em que se encontra. O meio pode ser o oxigênio do ar, gás, lubrificante, líquido ou até mesmo outro material sólido (BUCKLEY, 1981). O primeiro fator que determinará a magnitude da oxidação será o grau de interação entre a superfície e o meio. Parâmetros como composição, reatividade do óxido com o meio, espessura, porosidade e fragilidade do óxido irão determinar as características do processo de corrosão (BUCKLEY, 1981).

A Figura 14 apresenta uma representação esquemática do processo de degradação por corrosão nos casos em que a camada oxidada é removida pelo cisalhamento entre as superfícies, acelerando a degradação superficial.

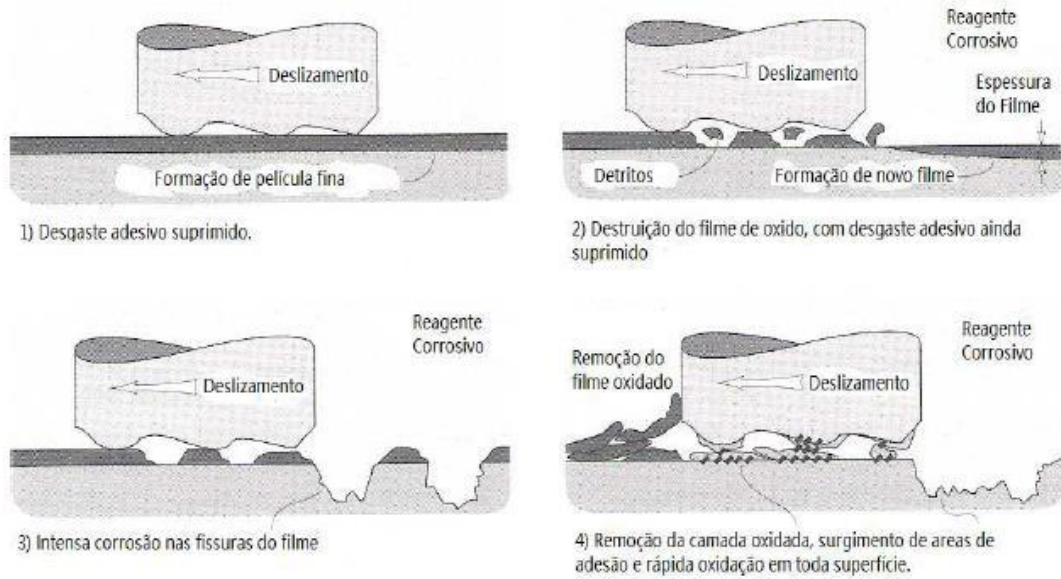


Figura 14: Processo de desgaste por corrosão.

#### 2.7.4- Desgaste por cavitação

Máquinas que trabalham com fluidos, se mal ajustadas, acabam sendo degradadas pelo processo de cavitação. Pontos de baixa pressão podem vaporizar o líquido, que leva as bolhas até um ponto de pressão mais elevada, aonde ocorre a condensação das bolhas e o colapso destas com a superfície da máquina, ocasionando a remoção de material nas regiões (TORREIRA, 2002). Mesmo que a cavitação tenha um processo similar ao desgaste erosivo, existem algumas diferenças significativas. A cavitação é um processo muito mais leve do que o processo erosivo. Um desgaste por cavitação acontece com o efeito de milhões de partículas, enquanto no processo de erosão algumas centenas de partículas já são suficientes para provocar o desgaste (STACHOWIAK, 2001).

#### 2.8- Ensaio de desgaste

Ensaio de desgaste são práticas muito importantes, pois com eles é possível fazer um estudo de degradação acelerada de dispositivos, simulando longos tempos de utilização em campo em um período de tempo relativamente curto. Os testes de laboratório se dividem em dois grupos. O primeiro grupo são os testes fenomenológicos que focam em alguma situação particular de desgaste como erosão, abrasão ou oxidação. O segundo grupo são os testes operacionais, que focam mais na aplicação do dispositivo como um todo, como por exemplo a análise de durabilidade de uma caixa de câmbio (BAYER, 2004).

### 2.8.1- Ensaio de disco de borracha com areia

Consiste em um teste para determinar desgaste abrasivo com baixo estresse. Um disco de borracha gira sobre a superfície em análise com baixa força de atuação enquanto a superfície de contato é exposta à material arenoso, conforme ilustração da Figura 15. A ASTM normatizou este ensaio como ASTM G65 (ASTM G65,2010) com uso de areia seca e ASTM G105 (ASTM G105, 2010) com uso de areia molhada, e nelas podem-se encontrar os parâmetros para a execução deste (BAYER, 2004).

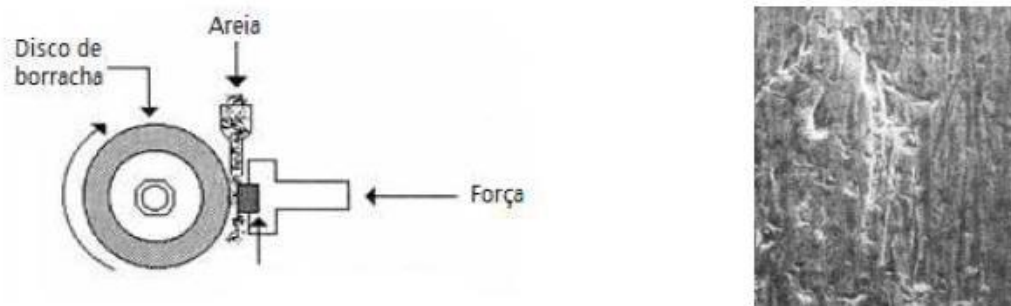


Figura 15:Ensaio de disco de borracha com areia

### 2.8.2- Ensaio de erosão de partículas sólidas

Encontrada na literatura como ASTM G76 (ASTM G76, 2010), este teste consiste na projeção de partículas sólidas contra uma superfície usando jatos de ar comprimido. Exemplo típico da aplicação da norma seria a simulação de uma superfície sendo atacada pela areia soprada pelo vento. A perda de massa é utilizada para determinar a quantidade de desgaste. A Figura 16 ilustra um dispositivo para este teste (BAYER, 2004).

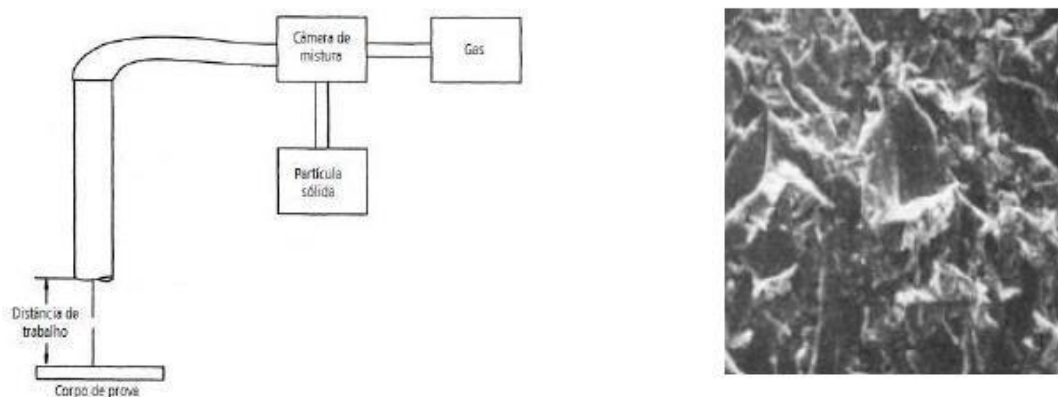


Figura 16: Ensaio de erosão de partículas sólidas.

### 2.8.3- Ensaio de erosão por cavitação

Este teste foi desenvolvido para simular o colapso das bolhas dos líquidos em alta pressão contra as paredes de sistemas hidráulicos, e tem sido usado com eficácia em testes de turbinas, bombas e tubos e na seleção de materiais com maior resistência a este tipo de desgaste (BAYER, 2004). O desgaste do corpo de prova, que é submerso em um líquido, acontece devido à alta vibração provocada por um transdutor ultrassônico. A norma ASTM G32 (ASTM G32, 2010) pode ser usada para conduzir este teste. A Figura 17 ilustra um dispositivo para este teste (BAYER, 2004).

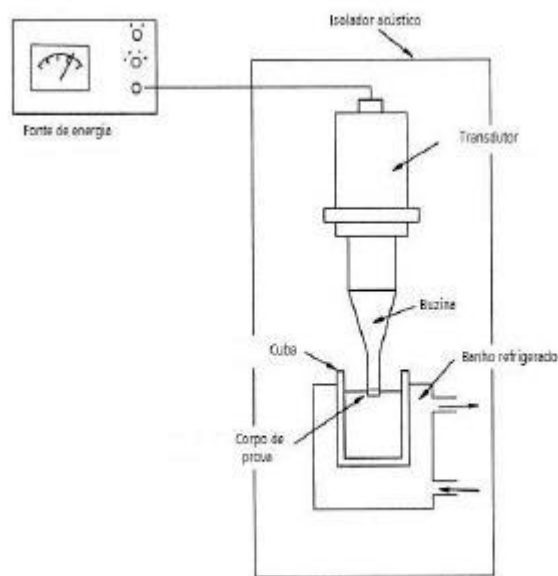


Figura 17: Ensaio de erosão por cavitação.

### 2.8.4- Ensaio de desgaste de quatro esferas

O teste de desgaste com esferas segue os procedimentos estabelecidos na norma ASTM D4172. Este teste tem o objetivo de determinar as propriedades dos fluidos lubrificantes em superfícies que deslizam em determinadas condições. Três esferas de 12,7 mm de diâmetro são engastadas juntas e cobertas por óleo lubrificante. Uma quarta esfera é colocada no topo das esferas e pressionada na cavidade das esferas engastadas, conforme demonstração da Figura 18. Após o aquecimento do lubrificante a esfera do topo é girada provocando cisalhamento entre as quatro esferas. A resposta do teste consiste em analisar o diâmetro das depressões provocadas nas esferas engastadas (ASTM D4172, 2010).



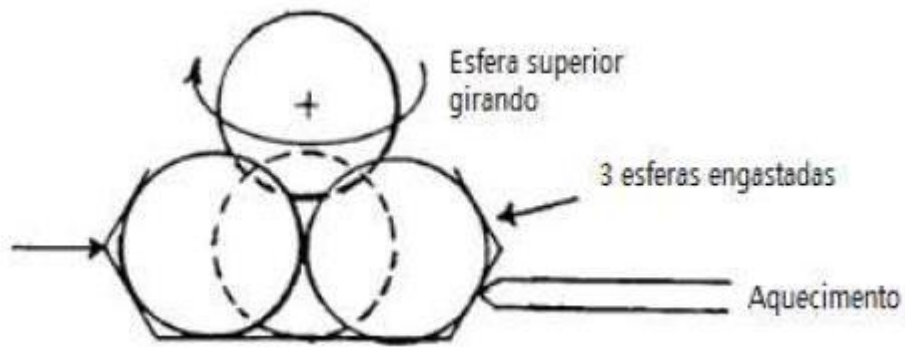


Figura 18: Ensaio de desgaste de quatro esferas.

#### 2.8.5- Ensaio de desgaste Bloco-Disco

Esta técnica de ensaio é aplicada para determinar o desgaste provocado pelo deslizamento de contatos lineares. É um teste bastante flexível pois pode utilizar qualquer tipo de material, lubrificante, atmosfera e variáveis de processo. O bloco de teste é pressionado contra o disco que encontra-se em rotação. Conforme a norma ASTM G77 (ASTM G77, 2010), o resultado do teste deve ser obtido pelo cálculo da perda de volume do bloco, através das dimensões do desgaste do bloco, e pela perda de volume do disco calculado, através do cálculo da perda de massa do disco. A Figura 19 ilustra o funcionamento deste teste.

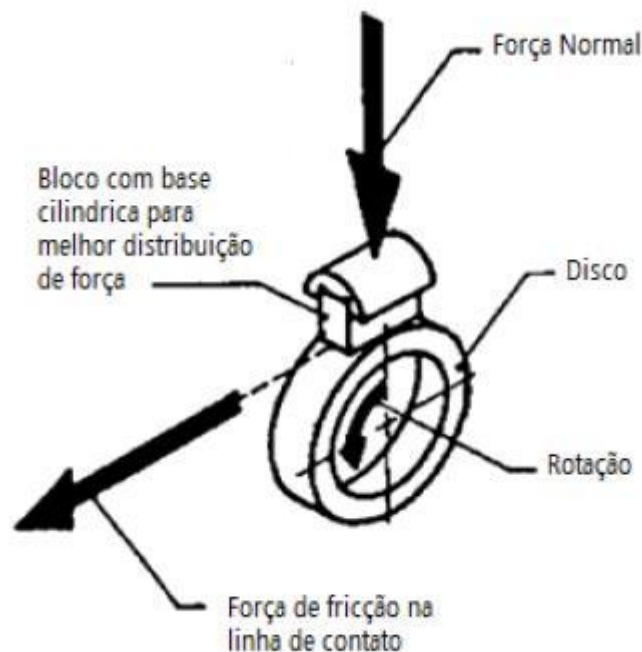


Figura 19: Ensaio de desgaste bloco-disco.

### 2.8.6- Ensaio de desgaste pino-disco

Esta técnica de ensaio é aplicada para determinar o desgaste provocado pelo deslizamento de contatos com áreas reduzidas. A máquina ou dispositivo de teste consiste em rotacional o disco ou fazer movimentos circulares com o pino para que haja um movimento discordante entre o pino e o disco. O resultado do ensaio é um risco circular no disco. A Figura 20 ilustra o funcionamento teórico do dispositivo.

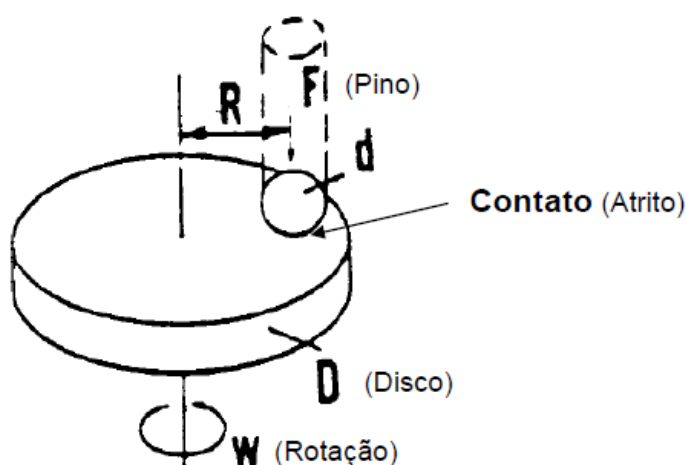


Figura 20: Ensaio de desgaste pino-disco.

Pode-se configurar o dispositivo tanto na horizontal quanto na vertical, contanto que o eixo do pino esteja perpendicular com a face do disco. Com carga pré-determinada, o pino é pressionado sobre o disco que está em movimento, sendo possível simular a carga utilizando dispositivos mecânicos, hidráulicos, pneumáticos e elétricos.

A determinação do desgaste é feita através da análise de perda de massa ou variação das medidas do disco e do pino realizadas antes e depois dos testes. A quantidade de desgaste é resultado de uma combinação de fatores como força aplicada, velocidade de deslizamento, distância percorrida, o meio em que o teste é realizado e as propriedades dos materiais. As características dos sistemas reais como meio corrosivo, temperatura, lubrificação e geometria podem levar o teste a resultados distantes dos valores reais, logo deve-se simular o maior número possível de variáveis.

## 2.9-Tipos de tribômetro

### 2.9.1- Tribômetro padrão

O tribômetro padrão (pino sobre disco) existente no Laboratório de Microanálises do Instituto de Física da UFRGS, o qual serve de exemplo para ilustrar o princípio de funcionamento deste tipo de equipamento. Assim, são apresentadas as características e as particularidades desta máquina, cuja fabricação é de origem inglesa da marca PLINT, modelo TE79. A figura 21 apresenta uma vista geral da referida máquina, onde são destacadas as suas principais partes (corpo de prova, compartimento do disco, braço de carga, motor principal, motor de liberação de carga e de regulagem do raio efetivo, base fixa e base móvel). A tabela 1 apresenta algumas características gerais deste equipamento.

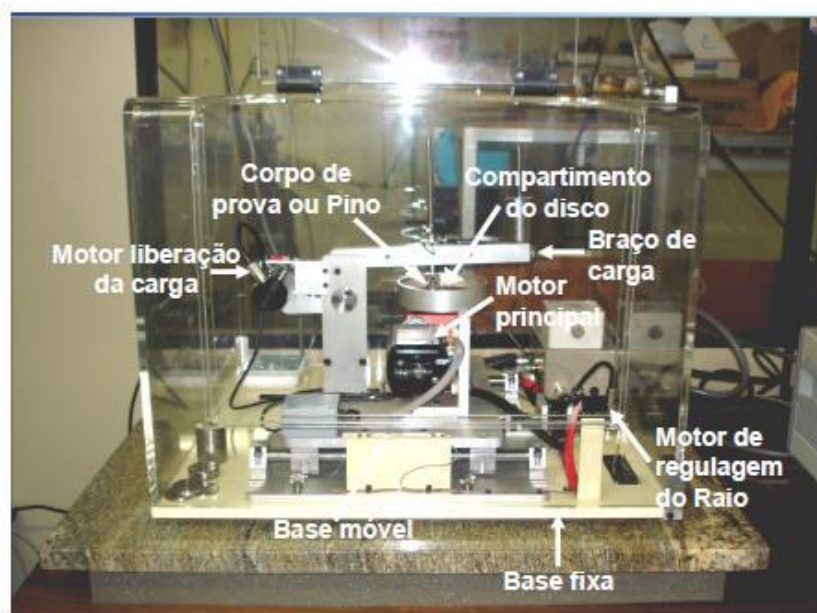


Figura 21: Tribômetro padrão.

Fonte: Laboratório de microanálises do Instituto de Física da UFRGS.

Características Técnicas	
Carga	0,1N à 20N
Potência principal do motor	50 W
Regulagem do raio de deslizamento	De 0 à 50 mm
Geometria dos corpos de prova	Cilíndrica ou esférica
Rotação do disco	De 0 à 400 rpm

Tabela 1: Características do equipamento.

Esse equipamento está dividido basicamente em três partes.

- I) Sistema de aplicação de carga: é composto pelo aplicador de carga, motor de liberação de carga e pelo dispositivo de fixação do corpo de prova, que pode ser de formato cilíndrico(pino) ou esférico(bola). A carga é regulada através de pesos fixos que podem ser colocados em duas posições diferentes sobre o braço de carga. Os valores destes pesos apresentam as seguintes configurações: 0,1 N-0,2 N-0,5 N-1,0 N-2,0 N e 5 N. Na primeira posição, logo acima do corpo de prova, tem-se o próprio valor da carga instalada (em Newtons), enquanto na segunda posição, os pesos são multiplicados por dois devido ao efeito de braço de alavanca formado pelo braço de carga da máquina. Dessa forma, se consegue diferentes combinações de força sobre o corpo de prova, numa resolução de 0,1 N e até o limite máximo de 20 N permitidos pelo equipamento. O braço de carga possui um motor de liberação de carga, o qual, através de um came girante aproxima ou afasta o corpo de prova do disco. O nivelamento do braço da carga é garantido por um dispositivo nivelador (líquido mais bolha de ar). Isso é importante a fim de garantir o contato perfeito entre o par de fricção. Por último, completa o sistema de aplicação da carga o dispositivo de fixação dos corpos de prova, também chamado de holder. Esses, fixadores se dividem em dois tipos, sendo um tipo para fixação de corpos de prova de geometria cilíndrica (diâmetros 3 mm, 5 mm ou 8 mm) e o outro tipo para fixação de corpos de prova de geometria esférica (diâmetros de 6 mm e 12 mm).

A figura 22 mostra as cargas (a) em ordem decrescente de peso e detalhes do sistema aplicador de carga(b).

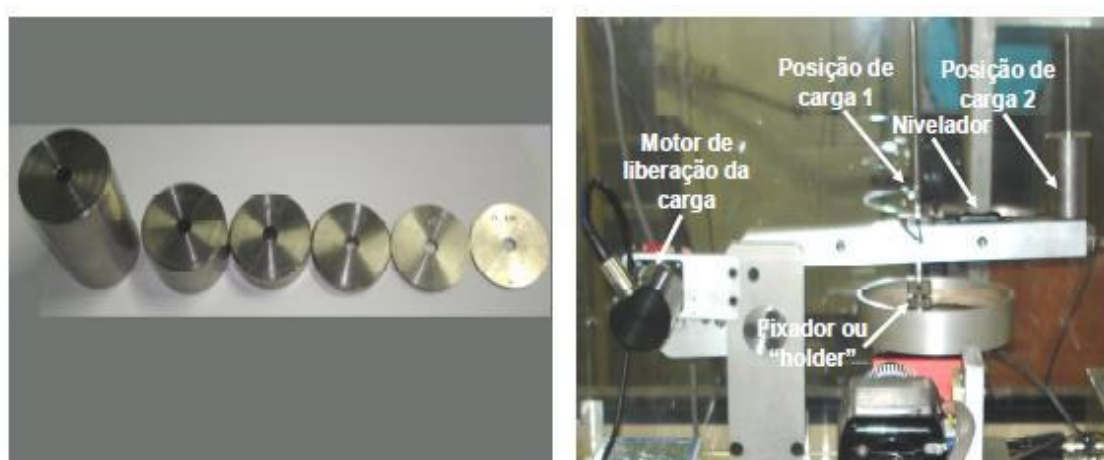


Figura 22: Sistema aplicador de cargas do tribômetro.

Fonte: Laboratório de microanálises do Instituto de Física da UFRGS.

- II) Sistema de rotação: é composto pelo motor principal, redutor e compartimento do disco. O motor principal possui 50W de potência e é capaz de atingir uma rotação de até 400 rpm. Devido à baixa potência desse motor, um sistema de redução de 10:1 aumenta o torque que é entregue ao compartimento que gira o disco.
- III) Base móvel e fixa: a base móvel aloja o sistema de rotação e é responsável por deslocá-lo lateralmente através de um fuso ligado a um motor de passo, ajustando o raio de deslizamento do corpo de prova sobre o disco. Já a base fixa não se movimenta e sobre ela está fixado o sistema de aplicação de carga e o motor de regulagem do raio, como podemos ver na figura 23.

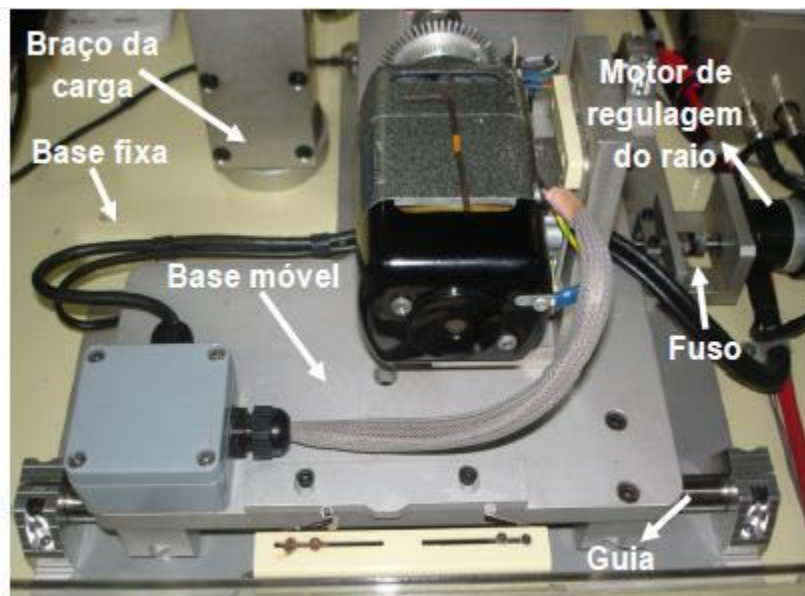


Figura 23: Componentes do tribômetro padrão.

Fonte: Laboratório de microanálises do Instituto de Física da UFRGS.

### **3- METODOLOGIA**

De acordo com os vários tipos de tribômetros existentes pudemos observar que era necessário um projeto que retratasse de forma fidedigna o contato de uma roda sobre um outro corpo. Dessa forma, foi fabricado no laboratório de soldagem e ciência dos materiais um tribômetro que atendesse essas características.

A partir do protótipo, realizamos o projeto e a caracterização dos componentes analisando o tipo de contato que seria estudado, seleção dos componentes, distribuição da carga, tipo de transmissão utilizada e o método de análise do desgaste.

O contato estudado neste projeto foi o tipo roda sobre disco, que se trata do contato de rolamento entre dois corpos, o corpo de prova 1, que no caso é estático entra em contato com um corpo 2 que gira segunda a rotação estipulada por um motor elétrico. A carga é aplicada perpendicularmente ao corpo 2.

Os fatores que influenciam a taxa de desgaste do corpo de prova 1 são: temperatura, coeficiente de atrito, dureza e a carga normal.

#### **3.1- Influência da temperatura**

A temperatura exerce uma forte influência na variação da taxa de desgaste, pois age como um potencial fator do aumento do coeficiente de atrito quando submetidos à ensaios de desgaste. Na literatura existem experimentos que mostram um aumento de 73% no coeficiente de atrito quando a temperatura varia da temperatura ambiente para temperatura perto dos 100°C [Osterle e Urban,2006].

#### **3.2- Influência do coeficiente de atrito**

O coeficiente de atrito atua como um dos principais fatores na taxa de desgaste dos materiais em ensaios com tribômetro. A seleção dos materiais é um importante item no experimento que deve ser selecionado de acordo com os parâmetros pré-determinados [Osterle e Urban,2006].

### **3.3- Influência da dureza dos materiais**

As durezas dos materiais estão intimamente ligadas a taxa de desgaste como o coeficiente de atrito, porém são características de cara material e deve-se selecionar os materiais tanto o disco quanto do corpo de prova para que se tenha resultados dentro do esperado [Fillot,2007].

### **3.4- Influência da carga normal**

A carga normal varia de acordo com cada experimento, sendo proporcional a taxa de desgaste, quanto maior a carga em um mesmo espaço de tempo, maior a taxa de desgaste.

Apesar de existirem diversos tipos de métodos de medidas de desgaste o método que será utilizado na avaliação dos resultados será o de pesagem. Ou seja, no início do processo o corpo de prova será pesado, e logo após o ensaio será pesado novamente. Assim a diferença entre o peso inicial e final será a taxa de desgaste do material.

Neste projeto selecionamos o motor elétrico que será responsável pela rotação em que o disco irá girar. Este motor é um motor monofásico ligado diretamente, ou seja, não possui um inversor de frequência para que varie a rotação.

O tipo de transmissão utilizada no projeto foi feita através de uma correia com perfil V para que não deslize na transmissão de rotação do motor para o prato(disco).

A carga é aplicada perpendicularmente ao prato, onde existe um suporte para a inserção de pesos de carga. Os pesos fazem com que o corpo de prova (a roda) deslize sobre o prato exercendo uma força normal ao sistema [Fillot,2007].

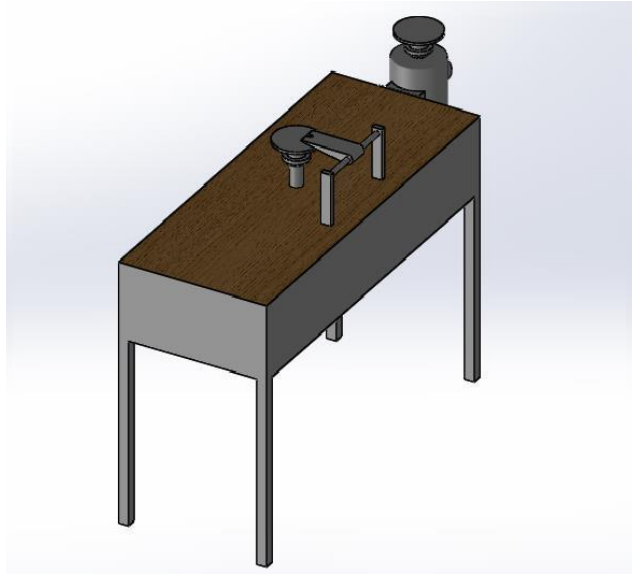


Figura 24: Projeto do tribômetro isométrica

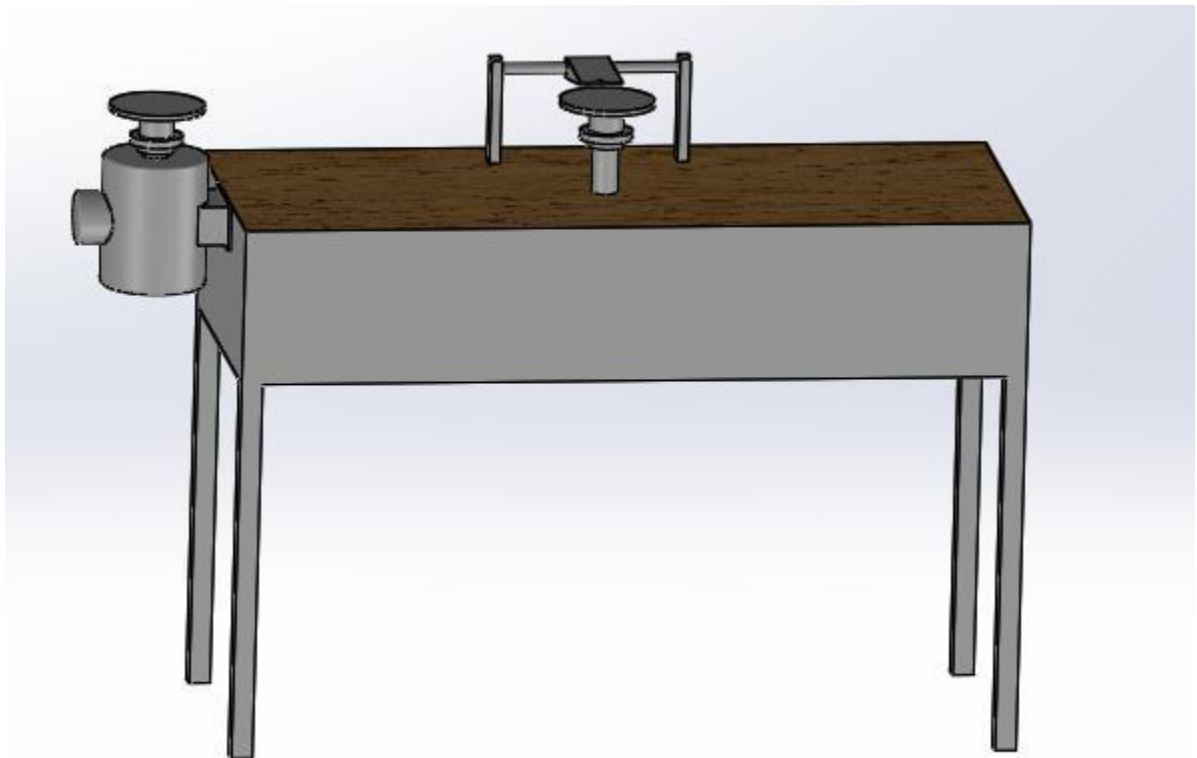


Figura 25: Projeto do tribômetro roda sobre disco vista lateral.



#### 4- RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a elaboração do projeto, pudemos elaborar um protótipo que por sua vez da forma ao que foi estudado e previsto pelo projeto. Apesar de ser um protótipo fomos capazes de observar diversas características de suma importância no estudo referente à tribologia, além também da importância da área de projetos na formação de engenheiros.

Dessa forma, pudemos observar que o contato entre o corpo de prova(roda) e o disco deve ser de forma perpendicular para que não haja deslizamento e interfira na taxa de desgaste do corpo de prova. A transmissão é outro fator que se deve ter uma atenção, pois como projetado, a transmissão é feita por uma correia, logo esta correia deve ser inspecionada para que esteja em boas condições, pois poderá deslizar pelas polias e interferir na transmissão da rotação do motor para o disco.

As figuras que seguem mostram como foi executado o projeto e foi observado diversos pontos a serem melhorados como por exemplo a utilização da automação na aquisição de dados e a forma da aplicação da carga.

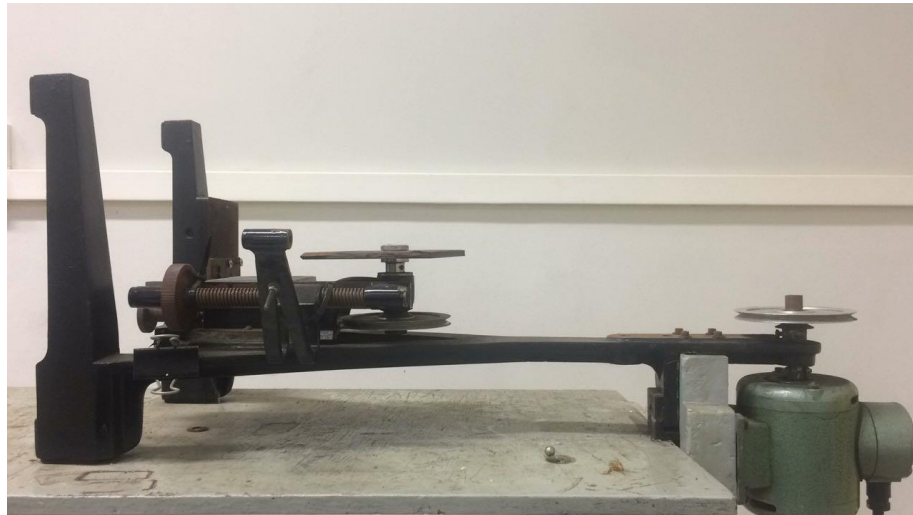


Figura 26: Tribômetro roda sobre disco

Fonte: Autor



Figura 27: Contato entre o corpo de prova(roda) e o disco

Fonte: Autor



Figura 28: Vista superior do Tribômetro

Fonte: Autor

O resultado do projeto mostra em um modelo real o que foi proposto pelo projeto, assim ainda possui alguns itens que devem ser ajustados para que possua melhores resultados na sua utilização em análises das taxas de desgaste. Entretanto, neste projeto foi atingido seu principal objetivo e que se possa posteriormente ser otimizado.

## 5 CONCLUSÃO

Analisando as características levantadas do projeto pôde-se observar que a proposta principal foi atingida, pois diversos fatores que são determinantes no projeto de um tribômetros bem como seu funcionamento foram estudados.

Os funcionamentos dos componentes do protótipo estudado referem-se ao contato da roda do vagão ferroviário com o trilho, pois a roda do vagão rola sobre o trilho como estudado na caracterização e realizado no protótipo. O prato simula o trilho e a roda de teste simula a roda do vagão, sendo que na realidade a roda do vagão é que está em movimento, porém para testes em laboratório esta simulação pode ser realizada sem a perda das características físicas do sistema. A velocidade do motor bem como o material do disco e da roda podem levar o ensaio a diferentes resultados, assim, deve-se ter parâmetros bem selecionados para que os resultados dos ensaios sejam o mais próximo do realizado em campo.

Alguns fatores foram estudados de forma mais superficial pois apresentavam grande relevância em ensaios e não necessariamente no projeto, que era o nosso principal objetivo.

Dessa forma, conseguiu-se desenvolver diversas características sobre o projeto em estudo, e com isso abrimos um leque de oportunidades para o desenvolvimento na área de projetos que a cada dia vem se fazendo mais necessária na formação de engenheiros.

## REFERÊNCIAS

Eriksson M., Bergman F., Jacobson S. **On the nature of tribological contact in automotive breaks.** 2002.pg. 26-36.

Fillot N., Iordanoff I., Berthier Y. **Wear modeling and the third body concept.** 2007.pg. 949-957.

Godet M. **The third body approach a mechanical view of wear.** 1984.pg. 437-452.

Osterle W., Urban I. **Third body formation on brake pads and rotors.**pg. 401-408.

ASTM D4172, Wear Preventive Characteristics of Lubricating Fluid (Four-Ball Method). **American Society for Testing and Materials.** ASM Society: United States, 5 p., 2010.

ASTM G32, Standard Test Method for Cavitation Erosion Using Vibratory Apparatus.**American Society for Testing and Materials.** ASM Society: United States, 14 p.,2003.

ASTM G65, Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus. **American Society for Testing and Materials.** ASM Society: United States, 12 p., 2002.

ASTM G76, Standard Test Method for Conducting Erosion Tests by Solid Particle Impingement Using Gás Jets. **American Society for Testing and Materials.** ASM Society: United States, 6 p., 2004.

ASTM G77, Standard Test Method for Ranking Resistance of Materials to Sliding Wear Using Block-on-Ring Wear Test. **American Society for Testing and Materials.** ASM Society: United States, 11 p., 2010.

HUTCHINGS, I.M. Tribology – Friction and Wear of Engineering Materials. London: Arnold, 1992.

Bayer G.R., 2004. Mechanical Wear Fundamentals and Testing. New York, Marcel Dekker: 399.

Randi P., Tribologia, conceitos e aplicações. Disponível em: <<http://www.bibl.ita.br/xiiiencita/FUND18.pdf>>. Acesso em: 09 Abril. 2019.

Purqueiro B., Aula 11 – Tribologia – Lubrificação/Eng. de Superfícies. Disponível em: <[https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4461808/mod\\_resource/content/0/aula11\\_tribologia\\_lub\\_sup.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4461808/mod_resource/content/0/aula11_tribologia_lub_sup.pdf)>. Acesso em: 10 Abril. 2019.

Farias M., Tribologia. Disponível em:<[https://www.ucs.br/site/midia/arquivos/18\\_04\\_Palestras\\_Tribologia\\_Profa\\_MCristinaMFarias.pdf](https://www.ucs.br/site/midia/arquivos/18_04_Palestras_Tribologia_Profa_MCristinaMFarias.pdf)>. Acesso em: 10 Abril.2019.