



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – UFOP**

**ESCOLA DE MINAS**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**



**GABRIEL HELENO DIAS BRITO**

**PROJETO MECÂNICO PARA EQUIPAMENTO DE ENSAIO DE DESGASTE POR  
ATRITO E ABRASÃO NO SISTEMA PINO-SOBRE-DISCO**

**OURO PRETO - MG  
2025**

**GABRIEL HELENO DIAS BRITO**

**`gabriel.helena@aluno.ufop.edu.br`**

**PROJETO MECÂNICO DE UM EQUIPAMENTO DE ENSAIO DE DESGASTE POR  
ATRITO E ABRASÃO NO SISTEMA PINO-SOBRE-DISCO**

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:** DSc. Diogo Antônio Sousa

**OURO PRETO – MG  
2025**

## SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

B862p Brito, Gabriel Heleno Dias.

Projeto mecânico para equipamento de ensaio de desgaste por atrito e abrasão no sistema pino-sobre-disco. [manuscrito] / Gabriel Heleno Dias Brito. - 2025.

102 f.: il.: , tab..

Orientador: Prof. Dr. Diogo Antônio Sousa.

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

1. Tribologia. 2. Atrito - Desgaste mecânico - Testes tribológicos. 3. Atrito - Desgaste mecânico - Tribômetro. I. Sousa, Diogo Antônio. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 621

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



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Gabriel Heleno Dias Brito**

### **Projeto mecânico de um equipamento de ensaio de desgaste por atrito e abrasão no sistema pino-sobre-disco**

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

Aprovada em 03 de Abril de 2025.

#### Membros da banca

DSc. Diogo Antônio de Sousa - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)  
DSc. Washington Luis Vieira da Silva (Universidade Federal de Ouro Preto)  
MSc. Sávio Sade Tayer (Universidade Federal de Ouro Preto)

Diogo Antônio de Sousa, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 05/05/2025



Documento assinado eletronicamente por **Diogo Antonio de Sousa, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 05/05/2025, às 20:20, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http://sei.ufop.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0904267** e o código CRC **A90A97EE**.

## **AGRADECIMENTOS**

Esta conquista é dedicada, primeiramente, a Deus, por guiar meus passos e iluminar meu caminho.

Aos meus pais, Luiz e Cristiane, pelo amor incondicional, pela força e pelo apoio constante em todos os meus sonhos e desafios. Vocês são minha base e minha maior inspiração.

Aos meus queridos avós, José de Márcio Dias e Terezinha da Silva Dias, por serem pilares de sabedoria e afeto em minha vida, sempre me ensinando com seu exemplo e carinho.

Ao meu orientador, Professor Diogo Antônio Sousa, pela paciência, dedicação e pelos valiosos ensinamentos que enriqueceram não apenas este trabalho, mas toda a minha trajetória acadêmica. Sua orientação foi fundamental para que eu chegasse até aqui.

Ao meu grande amigo de faculdade, Wentol Celestino, pelas risadas, pelos momentos de descontração e pelo apoio mútuo nos desafios acadêmicos. E à Joyce Dutra, por sua amizade sincera e por todos os aprendizados compartilhados.

A todos os professores, colegas e amigos que, de alguma forma, contribuíram para minha formação, meu muito obrigado. Cada conselho, cada incentivo e cada experiência vivida foram essenciais para esta conquista.

Que este seja apenas o início de uma jornada repleta de realizações!

Com gratidão,

Gabriel Heleno Dias Brito

## RESUMO

O trabalho consiste no projeto mecânico de um tribômetro do tipo pino sobre disco com peso livre. Trata-se de um equipamento destinado a simular processos de fricção e desgaste, desempenhando um papel de suma importância nos estudos tribológicos. O tribômetro pino contra disco simula o fenômeno de fricção e desgaste ao promover o contato entre um disco revestido com um material abrasivo e um pino (corpo de prova). Na configuração linear, o pino é pressionado contra o disco e movido em uma trajetória unidirecional, simulando um deslizamento unidirecional. Essa configuração fornece informações sobre o coeficiente de atrito, a taxa de desgaste linear e a aderência entre as superfícies de contato. O projeto deste tribômetro foi concebido para atender integralmente aos requisitos da norma internacional para ensaios tribológicos ASTM G99-17. Partindo de uma abordagem sistemática, o equipamento foi desenvolvido com configuração vertical compacta, incorporando sistema de acionamento independente e método de aplicação de carga por pesos livres, assegurando precisão e reprodutibilidade nas medições. No processo de dimensionamento, todos os componentes estruturais foram calculados para operar dentro dos parâmetros estabelecidos por padrões técnicos reconhecidos. A estrutura principal foi projetada com materiais selecionados para garantir a necessária rigidez e estabilidade durante os ensaios. Particular atenção foi dada ao sistema de alinhamento, que incorpora mecanismos de ajuste fino para garantir a perfeita perpendicularidade entre os elementos de teste. Além disso o sistema de medição foi cuidadosamente especificado para atender às exigências de precisão metrológica. A arquitetura do equipamento permite rápida troca de amostras, facilitando a realização de séries experimentais completas. O estudo desenvolvido representa uma solução completa para estudos tribológicos, combinando conformidade com padrões internacionais, precisão técnica e viabilidade econômica. O projeto demonstra que é possível desenvolver equipamentos de pesquisa de alta qualidade através de soluções inteligentes e bem fundamentadas tecnicamente.

**Palavras-chave:** Tribologia, Tribômetro, Testes tribológicos, Desgaste, Atrito.

## **A B S T R A C T**

The work consists of the mechanical design of a pin-on-disc tribometer with free weight. This is a device designed to simulate friction and wear processes, playing a very important role in tribological studies. The pin-on-disc tribometer simulates the phenomenon of friction and wear by promoting contact between a disc coated with an abrasive material and a pin (test specimen). In the linear configuration, the pin is pressed against the disc and moved in a unidirectional path, simulating unidirectional sliding. This configuration provides information on the coefficient of friction, the linear wear rate and the adhesion between the contact surfaces. The design of this tribometer was conceived to fully meet the requirements of the international standard for tribological tests ASTM G99-17. Based on a systematic approach, the equipment was developed with a compact vertical configuration, incorporating an independent drive system and a method of applying load by free weights, ensuring accuracy and reproducibility in measurements. In the dimensioning process, all structural components were calculated to operate within the parameters established by recognized technical standards. The main structure was designed with selected materials to ensure the necessary rigidity and stability during the tests. Particular attention was paid to the alignment system, which incorporates fine adjustment mechanisms to ensure perfect perpendicularity between the test elements. In addition, the measurement system was carefully specified to meet the requirements of metrological precision. The equipment architecture allows for rapid sample exchange, facilitating the performance of complete experimental series. The study developed represents a complete solution for tribological studies, combining compliance with international standards, technical precision and economic viability. The project demonstrates that it is possible to develop high-quality research equipment through intelligent and technically well-founded solutions.

Keywords: Tribology, Tribometer, Tribological tests, Wear. Friction.

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 2.1: Esquema dos fenômenos estudados na tribologia. ....  | 19 |
| Figura 2.2: Pintura rupestre demonstrando o transporte de colosso egípcio utilizando a aspersão de líquido para a redução de atrito a cerca de 1900 A.C..... | 20 |
| Figura 2.3: Tribômetros (Leonardo da Vinci) para determinação da força de atrito .....   | 21 |
| Figura 2.4: Esquema de um tribossistema .....  | 22 |
| Figura 2.5: Potencial de economia com a implementação de novas técnicas tribológicas em máquinas e equipamentos na Inglaterra em 1966 e 2016. ....           | 23 |
| Figura 2.6: Processo de transferência de metal devido à adesão. ....   | 26 |
| Figura 2.7: Transferência de material no desgaste por adesão. ....   | 26 |
| Figura 2.8: Desgaste por adesão em um eixo. ....   | 27 |
| Figura 2.9: Influência da estrutura cristalina sobre o coeficiente de adesão e dureza .....  | 28 |
| Figura 2.10: Diagrama de compatibilidade para pares de metais baseado em diagramas de fase binários. ....  | 29 |
| Figura 2.11: Exemplos de desgaste abrasivo a dois corpos e três corpos.....  | 30 |
| Figura 2.12: Mecanismos de desgaste envolvidos em desgaste abrasivo. ....  | 31 |
| Figura 2.13: Esquema ilustrativo do micromecanismo de desgaste abrasivo por microcorte ..  | 32 |
| Figura 2.14: Esquema ilustrativo do micromecanismo de desgaste abrasivo por sulcamento. ....   | 32 |
| Figura 2.15: Esquema ilustrativo do micromecanismo de desgaste abrasivo por microtrincamento ou lascamento. ....   | 33 |
| Figura 2.16: Relação entre corte e sulcamento como função da relação entre o ângulo de ataque e ângulo de ataque crítico.....                                | 33 |
| Figura 2.17:Crateração severa gerada por fadiga superficial nos dentes de uma engrenagem. ....   | 35 |
| Figura 2.18:Relação corrosão com o tempo para (a) sistema em que se forma um filme protetor e (b) sistema em que não ocorre a formação do filme.....         | 36 |
| Figura 2.19: Camada oxidada removida por cisalhamento. ....  | 37 |
| Figura 2.20: A força de atrito, $F$ , é necessária para deslocar um objeto carregado por uma força normal, $W$ . ....  | 39 |
| Figura 2.21:Exemplo de tribômetros usados para a medida do coeficiente de atrito. ....   | 41 |
| Figura 2.22:Esquema do sistema de teste de desgaste pino-disco.....  | 42 |
| Figura 3.1:Definição funções Tribômetro.....   | 52 |
| Figura 3.2: Planejamento dos passos para projeto mecânico de dispositivo pino sobre disco. ....  | 53 |
| Figura 4.1: Desenho 3D do equipamento projetado. ....  | 57 |
| Figura 4.2: Desenho 3D do equipamento projetado. ....  | 57 |
| Figura 4.3: Mesa de apoio dos componentes do tribômetro. ....  | 64 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 4.4: Descrição de motor dimensionado. ....  | 68 |
| Figura 4.5: Tabela de corrente de cabos elétricos. ....                                  | 71 |
| Figura 4.6: Projeto elétrico tribômetro com acionamento via inversor de frequência. .... | 75 |

## **LISTA DE TABELAS**

|  |    |
|--|----|
| Tabela 2.1: Tribômetros e mecanismos de desgaste.....                            | 46 |
| Tabela 3.1: Comparação dos aspectos da pesquisa qualitativa e quantitativa. .... | 51 |
| Tabela 3.2: Requisitos de projeto.....   | 53 |
| Tabela 3.3: Variáveis e indicadores do trabalho abordado. ....                   | 54 |

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

### SIGLAS

|                                    |   |  |
|------------------------------------|---|--|
| $\varnothing$                      | - | Diâmetro (ex.: $\varnothing$ Min = 50–60 mm, $\varnothing$ Max = 100–120 mm) |
| $\pi$                              | - | Pi (constante matemática, $\sim 3.1416$ )                                    |
| $\omega$                           | - | Velocidade angular (em rad/s)  |
| $\alpha$                           | - | Aceleração angular (em rad/s <sup>2</sup> )                                  |
| $\eta$                             | - | Eficiência (ex.: $\eta = 90\%$ para o motor WEG W22)                         |
| $\mu, \mu_s, \mu_k$                | - | Coefficiente de atrito (geral, estático e cinético)                          |
| I                                  | - | Corrente elétrica (A) / Momento de inércia (kg/m <sup>2</sup> )              |
| P                                  | - | Potência (W ou CV)   |
| V                                  | - | Tensão elétrica (V) / Volume de desgaste                                     |
| N                                  | - | Rotação (rpm) / Força normal   |
| T                                  | - | Torque (Nm)  |
| F, F <sub>s</sub> , F <sub>k</sub> | - | Força de atrito (geral, estática e cinética)                                 |
| K                                  | - | Fator de probabilidade de fratura  |
| S                                  | - | Distância de deslizamento  |
| H                                  | - | Dureza do material   |
| r                                  | - | Raio   |

### ABREVIATURAS

|          |   |  |
|----------|---|--|
| CV       | - | Cavalo-vapor (1 CV $\approx$ 746 W)        |
| RPM      | - | Rotações por minuto                        |
| Hz       | - | Hertz (frequência)                         |
| A        | - | Ampère (corrente elétrica)                 |
| V        | - | Volt (tensão elétrica)                     |
| W        | - | Watt (potência)                            |
| Nm       | - | Newton-metro (torque)                      |
| mm       | - | Milímetro                                  |
| kg       | - | Quilograma                                 |
| m/s      | - | Metro por segundo                          |
| rad/s    | - | Radiano por segundo                        |
| FS       | - | Fator de segurança (ex.: FS = 1.5)         |
| VVW      | - | Controle vetorial (inversor WEG CFW100)    |
| V/F      | - | Controle escalar (tensão/frequência)       |
| PE       | - | Terra (Proteção Elétrica)                  |
| L1/L2/L3 | - | Terminais de fase                          |
| U/V/W    | - | Terminais de saída do inversor             |
| ASTM     | - | American Society for Testing and Materials |
| PTFE     | - | Politetrafluoretileno (Teflon)             |
| CAD      | - | Computer-Aided Design                      |

## SUMÁRIO

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO</b> .....   | <b>14</b> |
| 1.1      | Formulação do Problema .....  | 14        |
| 1.2      | Justificativa .....   | 16        |
| 1.3      | Objetivos .....   | 17        |
| 1.3.1    | Objetivo Geral .....  | 17        |
| 1.3.2    | Objetivos Específicos .....   | 18        |
| 1.4      | Estrutura do Trabalho .....   | 18        |
| <b>2</b> | <b>REVISÃO BIBLIOGRAFICA</b> .....                                  | <b>19</b> |
| 2.1      | Tribologia: Conceito e Breve Histórico .....                        | 19        |
| 2.2      | Tribossistema .....   | 21        |
| 2.3      | Considerações econômicas .....                                      | 22        |
| 2.4      | Mecanismo de Desgaste .....   | 24        |
| 2.5      | Desgaste por adesão .....   | 25        |
| 2.6      | Fatores de desgaste por adesão .....                                | 28        |
| 2.7      | Desgaste por abrasão .....  | 30        |
| 2.8      | Desgaste por fadiga superficial .....                               | 34        |
| 2.9      | Desgaste tribocorrosivo .....                                       | 35        |
| 2.10     | Origem da Força De Atrito .....                                     | 38        |
| 2.11     | Características do Atrito .....                                     | 39        |
| 2.12     | Ensaio de Desgaste .....  | 40        |
| 2.13     | Tribômetro .....  | 41        |
| 2.14     | Método do pino sobre disco .....                                    | 41        |
| 2.15     | Norma ASTM G99 .....  | 42        |
| 2.16     | Resumo da Norma ASTM G99 .....                                      | 43        |
| 2.17     | Projetos Mecânicos .....  | 49        |
| 2.18     | Fundamentação Teórica para o Projeto do Tribômetro Pino-Disco ..... | 49        |
| <b>3</b> | <b>METODOLOGIA</b> .....  | <b>51</b> |
| 3.1      | Tipo de pesquisa .....  | 51        |
| 3.2      | Materiais e Métodos .....   | 52        |
| 3.3      | Variáveis e Indicadores .....                                       | 54        |
| 3.4      | Instrumento de coleta de dados .....                                | 54        |
| 3.5      | Tabulação dos dados .....   | 55        |
| <b>4</b> | <b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....                                 | <b>57</b> |
| 4.1      | Especificações .....  | 58        |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 4.2      | Projeto mecânico.....   | 62        |
| 4.2.1    | Motorização.....  | 65        |
| 4.3      | Descrição Geral da Operação, Manutenção e Montagem do Produto ..... | 77        |
| 4.4      | Análise Financeira dos componentes necessários para construção..... | 78        |
| 4.5      | Componentes a Serem Adquiridos Comercialmente .....                 | 79        |
| 4.6      | Considerações sobre Materiais:.....                                 | 79        |
| 4.7      | Processo de Integração:.....  | 80        |
| 4.8      | Custos Envolvidos no Projeto Real.....                              | 80        |
| 4.9      | Viabilidade Econômica e Retorno do Investimento.....                | 84        |
| 4.10     | Custos Totais do Projeto .....                                      | 84        |
| 4.11     | Benefícios e Aplicações do Tribômetro .....                         | 84        |
| 4.12     | Estimativa de Economia com Testes Internos .....                    | 85        |
| 4.13     | Cálculo do Retorno do Investimento (ROI).....                       | 86        |
| 4.14     | Payback (Tempo de Retorno do Investimento).....                     | 86        |
| 4.15     | Análise de Sensibilidade .....                                      | 86        |
| 4.16     | Conclusão da análise econômica.....                                 | 87        |
| <b>5</b> | <b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>                             | <b>87</b> |
| 5.1      | Conclusões .....  | 87        |
| 5.2      | Recomendações.....  | 88        |
|          | <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>                              | <b>89</b> |
|          | <b>APENDICE A.....</b>  | <b>91</b> |

# 1 INTRODUÇÃO

Este trabalho visa a elaboração do projeto de um tribômetro do tipo pino-sobre-disco, destinado à realização de ensaios de atrito e desgaste por deslizamento. Inserido no campo da tribologia, ciência que investiga o comportamento do atrito e do desgaste em materiais sob contato mecânico e movimento relativo, considerando variáveis como pressão, velocidade de deslizamento, temperatura, lubrificação, vibração e ambiente, o trabalho classifica diversos modelos de tribômetros conforme suas aplicações e apresenta um planejamento detalhado para a execução de testes tribológicos. Adicionalmente, são descritos os equipamentos que compõem o tribômetro proposto

## 1.1 Formulação do Problema

A tribologia é definida como “a ciência e a tecnologia da interação de superfícies em movimento relativo e das práticas a elas relacionadas” (JOST, 1966). A tribologia estuda sistematicamente o desgaste, lubrificação e o atrito.

Desgaste é a “Perda progressiva de matéria da superfície de um corpo em consequência do movimento relativo de um outro corpo sobre o mesmo”. É crucial compreender os processos envolvidos para reduzir ou prevenir o desgaste, devido ao seu impacto significativo nos equipamentos e nos custos econômicos.(HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017)

Os principais mecanismos de desgaste são: desgaste por deslizamento, desgaste abrasivo, desgaste erosivo (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017). Segundo EYRY (1978), o desgaste por deslizamento é responsável por 15% de toda a matéria perdida na indústria o que o torna muito importante de ser estudado.

Zum Gahr (1987) descreve o desgaste por deslizamento como sendo o desgaste que ocorre devido ao movimento relativo entre duas superfícies sólidas lisas em contato sob carga, onde o dano superficial durante o deslizamento translacional não ocorre por sulcos superficiais profundos devido à penetração de asperezas ou partículas estranhas.

Ainda segundo o autor as superfícies podem ser de natureza metálica ou não metálica, lubrificadas ou não. Exemplos comuns de peças sujeitas ao desgaste por deslizamento são: mancal de deslizamento, sistemas came-seguidor, sistema roda-trilho, engrenagens, anéis de pistão de motores a combustão, pistão de compressores herméticos etc.

Atrito e desgaste não são propriedades intrínsecas do material, mas são características do sistema de engenharia (tribosistema). O atrito é a resistência ao movimento e surge das interações dos sólidos na área real de contato.

Atrito e desgaste são, respetivamente, causas sérias de dissipação de energia e perda de matéria (ZUM GAHR, 1987). Desta forma, é fundamental estudar o desgaste, atrito e lubrificação para avaliar os mais diversos materiais e condições de uso por meio de ensaios tribológicos, para isso são necessários os tribômetros.

Segundo Batchelor e Stachowiak (2004) tribômetros, ou dispositivos para medir atrito e desgaste, são a tecnologia básica usada na maioria das investigações tribológicas.

O autor descreve que um tribômetro cuidadosamente selecionado pode simular todas as características críticas de um problema de desgaste ou atrito sem as dificuldades associadas à experimentação em equipamentos reais (ensaios de campo).

Por outro lado, um tribômetro mal projetado ou selecionado pode fornecer resultados totalmente falsos, de modo que um conhecimento completo das características dos tribômetros é essencial para qualquer programa de teste tribológico.

Todos os tribômetros contêm um par tribológico, que é o foco dos testes conduzidos e forma o núcleo do equipamento. Os tribômetros também contêm vários componentes auxiliares que fornecem movimento, impõem carga e fornecem lubrificante ou atmosfera de gás especial.

Tribômetros mais avançados são equipados com instrumentação para medir o coeficiente de atrito, as taxas de desgaste e, muitas vezes, também a temperatura (STACHOWIAK, BATCHELOR E STACHOWIAK, 2004).

Além dessas características básicas, os tribômetros diferem consideravelmente em design e função. A grande quantidade de tribômetros existentes é devido a variedade de desgaste que ocorrem nas situações reais que precisam ser simuladas em laboratório.

Muitos métodos experimentais diferentes têm sido usados para estudar o desgaste por deslizamento alguns dos mais comuns são: pino sobre disco, bloco sobre anel, pino sobre placa alternado, disco duplo e anel sobre anel (HUTCHINGS E SHIPWAY, 2017).

Dentre desses o pino sobre disco é, provavelmente, o mais empregado para estudar o desgaste por deslizamento a seco ou lubrificado.

No ensaio pino sobre disco um pino é pressionado contra um disco giratório em sua superfície plana. As dimensões do pino e do disco dependem do tipo de teste realizado. O

aparelho oferece um controle muito melhor das condições experimentais e, por esse motivo, está se tornando cada vez mais usado em detrimento de outros tribômetros (STACHOWIAK, BATCHELOR E STACHOWIAK, 2004).

O aparelho permite que experimentos sejam conduzidos sob condições relativamente estáveis sem variações sistemáticas, por ex. na área de contato ou na velocidade de deslizamento, como ocorrem frequentemente em outros tribômetros. E é um dos poucos testes tribológicos normatizados pela ASTM, com a norma “*Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus*” (ASTM G99-17).

Desta forma, neste trabalho foi projetado um equipamento pino sobre disco seguindo as boas práticas de engenharia e no qual pode-se controlar as principais variáveis de ensaio: velocidade deslizamento e força normal, permite ensaio a seco ou lubrificado e possibilita a monitoração do coeficiente de atrito conforme norma ASTM G99-17.

Nesse quesito, o presente trabalho apresenta a seguinte pergunta:

**Como realizar o projeto mecânico de um equipamento tribômetro pino sobre disco?**

## **1.2 Justificativa**

O desgaste por deslizamento é observado quando há um movimento relativo entre duas superfícies sólidas em contato sob uma carga normal. Diferentemente do desgaste por abrasão, onde as asperezas penetram profundamente, no desgaste por deslizamento, o dano à superfície é causado principalmente pelas tensões de contato (ZUM GAHR, 1987).

Hutchings (1992) destaca a importância do estudo do desgaste por deslizamento na engenharia mecânica, além disso explora os fundamentos da tribologia e oferece uma visão abrangente sobre o desgaste de materiais e suas implicações.

Os ensaios de materiais são usados para caracterizar as propriedades mecânicas e o comportamento mecânico dos materiais. Eles envolvem a aplicação de técnicas específicas e o uso de conceitos e metodologias para obter informações sobre como os materiais se comportam sob diferentes condições de carga e deformação. Essas informações são importantes para avaliar a resistência, a tenacidade, a ductilidade e outras propriedades dos materiais em questão.

De acordo com Garcia (2012), os ensaios de materiais são fundamentais para garantir a qualidade e a confiabilidade dos produtos na engenharia. Além disso podem ser classificados em duas classes, de acordo com os resultados obtidos e os aspectos avaliados.

Ainda segundo o autor quanto à integridade geométrica e dimensional do componente, são ensaios realizados para avaliar a integridade, as características geométricas e dimensionais de uma peça ou componente. Por exemplo os ensaios destrutivos, que podem resultar na inutilização parcial ou total da amostra testada. Esses ensaios são executados de forma a provocar deformações e falhas no material, permitindo assim a análise de suas propriedades e comportamento quando submetido a diferentes condições de carga (GARCIA, 2012).

Quanto à velocidade de aplicação de carga, estes são os ensaios que são classificados com base na velocidade com a qual a carga é aplicada à amostra em teste. Essa classificação permite entender melhor o comportamento do material em diferentes condições de velocidade. (GARCIA, 2012).

No entanto, os resultados obtidos não estão relacionados à integridade geométrica e dimensional do componente em si. Essa classificação não está diretamente ligada à destrutividade do ensaio, mas sim à maneira como a carga é aplicada e sua velocidade de aplicação. (GARCIA, 2012).

Em resumo, o entendimento do desgaste por deslizamento e dos ensaios de materiais é essencial para um projeto mecânico, pois possibilita a identificação e mitigação do desgaste, bem como a seleção adequada de materiais resistentes ao deslizamento, contribuindo para a durabilidade e confiabilidade dos componentes mecânicos.

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Objetivo Geral**

Projetar as principais partes de um tribômetro do tipo pino sobre disco com peso morto.

### **1.3.2 Objetivos Específicos**

- Realizar revisão bibliográfica sobre os princípios do projeto mecânico de um tribômetro de pino sobre disco com peso livre e abordar conceitos teóricos de tribologia, atrito e desgaste;
- Definir a metodologia, passos e fases do projeto mecânico do tribômetro;
- Projetar o tribômetro pino sobre disco com peso morto usando o SolidWorks; considerando os requisitos da norma ASTM G99.

### **1.4 Estrutura do Trabalho**

O trabalho se divide nos seguintes tópicos: Introdução, Revisão Bibliográfica, Metodologia, Resultados e Discussões e, finalmente, Conclusão. Além das referências bibliográficas e o anexo.

O segundo capítulo será dedicado à fundamentação teórica, abordando conceitos relacionados a tribologia, ao desgaste e ao atrito, características do dispositivo pino sobre disco, fundamentação e conceitos sobre testes tribológicos, os materiais utilizados na construção do dispositivo e o método de simulação aplicado.

O terceiro capítulo será direcionado a definição da metodologia de desenvolvimento do projeto e suas fases, sendo apresentado as especificações sobre o equipamento com propósito de definir os seus parâmetros de funcionamento.

No quarto capítulo será abordado o desenvolvimento do projeto do equipamento pino sobre disco. Será apresentado o projeto conceitual do dispositivo, detalhes sobre o dimensionamento e seleção dos principais componentes, informações sobre a montagem do dispositivo e considerações relevantes em relação à segurança.

Por fim, no quinto capítulo de considerações finais, serão apresentadas as conclusões do trabalho, destacando as contribuições alcançadas. Além disso, serão feitas sugestões para trabalhos futuros, indicando possíveis direções de pesquisa e aprimoramentos no dispositivo pino sobre disco.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA

### 2.1 Tribologia: Conceito e Breve Histórico

Bhushan (2001), define tribologia como uma ciência e tecnologia que estuda as superfícies em movimento relativo e assuntos relacionados, bem como suas práticas. Ela engloba a compreensão da natureza das interações que ocorrem na interface em movimento, controlando o comportamento de atrito, desgaste e lubrificação.

A origem do termo "Tribologia" é atribuída ao grego "**TRIBO**", que significa "esfregar", e ao sufixo "**LOGIA**", que significa "estudo ou aprendizado", Figura 2.1. Em uma tradução literal, Tribologia significa "Estudo do Atrito", ou seja, e o estudo do movimento de um corpo sob a ação de uma força em relação a um segundo corpo, formando um sistema dependente de alguns parâmetros.

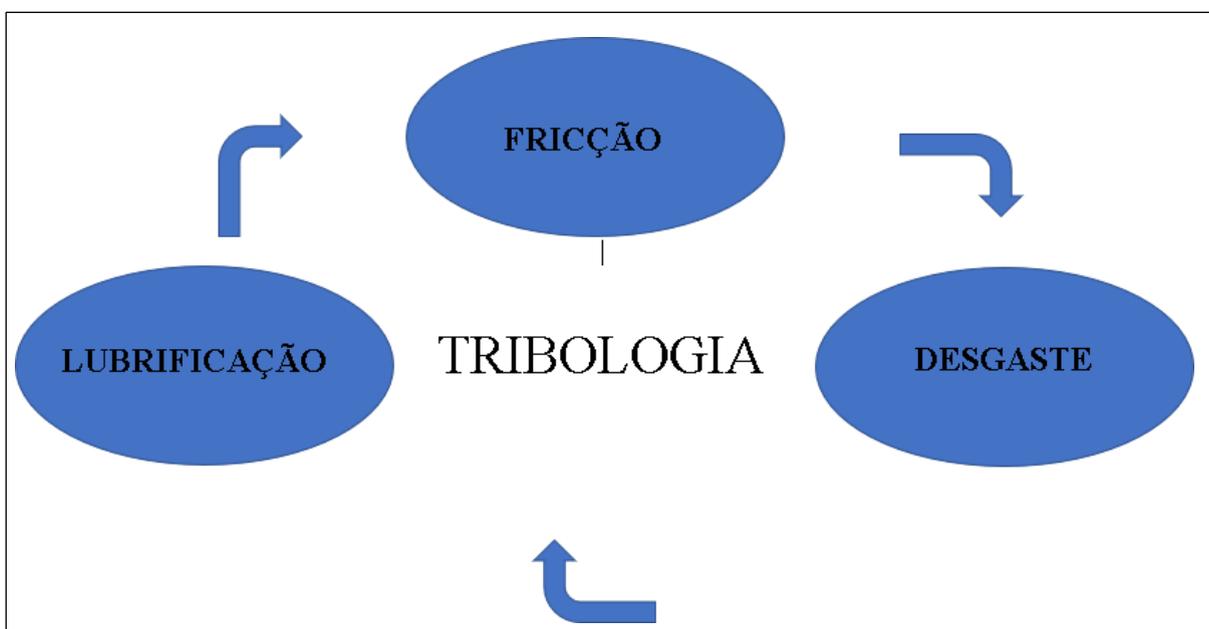


Figura 2.1: Esquema dos fenômenos estudados na tribologia.

Fonte: Pesquisa direta (2025).

A invenção da roda pelo homem teve um papel fundamental no desenvolvimento da civilização, mas o atrito afetou seu progresso de várias maneiras a roda com um eixo, como a conhecemos hoje, foi uma revolução, permitindo seu potencial de movimento e transporte.

De acordo com Stoeterau (2004), as primeiras representações da roda são encontradas em tumbas de faraós na Mesopotâmia, mostrando como as rodas eram fixadas a eixos. Além disso, ilustrações no antigo Egito retratam o uso de rolos e pranchas para transportar figuras

colossais. Essas representações incluem o uso de lubrificação, demonstrando a preocupação com a redução do atrito, Figura 2.2.

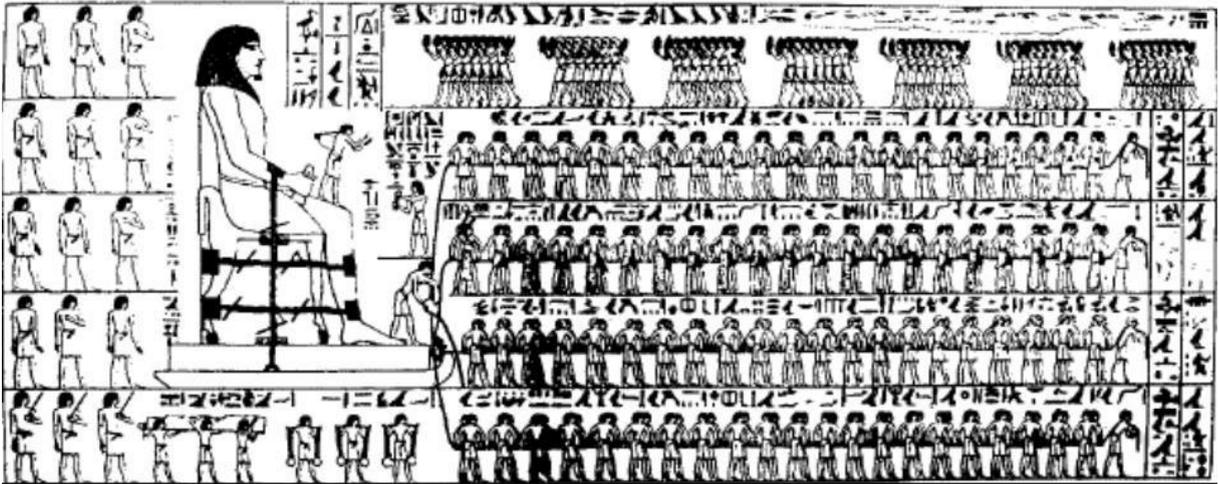


Figura 2.2: Pintura rupestre demonstrando o transporte de colosso egípcio utilizando a aspersão de líquido para a redução de atrito a cerca de 1900 A.C.

Fonte: Halling (1983).

Zum Gahr (1987) enfatiza que Leonardo da Vinci (1452–1519), considerado o pai da tribologia moderna, fez importantes contribuições para o entendimento dos fenômenos de atrito e desgaste. Segundo o autor Da Vinci estudou as forças de atrito em planos horizontais e inclinados, demonstrando que elas são dependentes da força normal ao deslizamento dos corpos e independentes da área de contato aparente, Figura 2.3.

Ele também propôs uma distinção entre o atrito de escorregamento e o de rolamento, e introduziu o coeficiente de atrito como sendo proporcional à força normal.

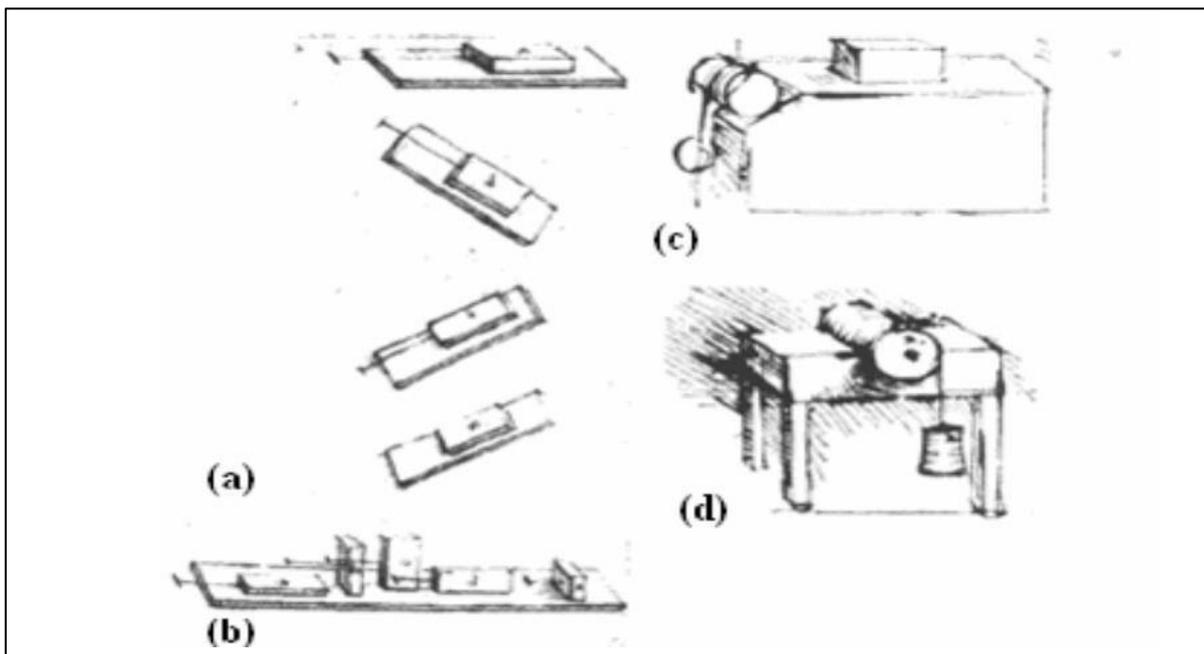


Figura 2.3: Tribômetros (Leonardo da Vinci) para determinação da força de atrito

Fonte: Anais do XIII ENCITA (2007)

A tribologia é vista como uma ciência que estuda fenômenos de superfície relacionados à fricção, desgaste e lubrificação. Ela abrange diversas áreas do conhecimento tecnológico, como ciência dos materiais, química, física, fabricação, metrologia, projeto e automação. Atribui-se à tribologia a análise de problemas tribológicos, tais como o desenvolvimento de materiais tribológicos especiais, estudo de lubrificantes e aditivos (STOETERAU, 2004).

## 2.2 Tribossistema

Segundo Horst Czichos (1978), o sistema tribológico, também conhecido como tribossistema, é um fenômeno que envolve o estudo do desgaste, atrito e lubrificação. Ele é influenciado por diversos fatores, não se restringindo apenas às propriedades dos materiais envolvidos.

Esses fatores incluem as condições de ensaio, condições ambientais, características superficiais, presença de lubrificantes, óxidos ou abrasivos, e o tipo de desgaste ocorrente, entre outros.

Zum Gahr (1987) descreve que um o tribossistema é responsável por transformar as entradas, como movimentos impostos e forças, em saídas úteis, como movimento, ou em perdas, como produtos de desgaste, calor e vibrações. Nem todos os elementos do tribossistema precisam estar presentes simultaneamente.

Essa abordagem do tribossistema permite o estudo e a compreensão do atrito, desgaste e lubrificação, considerando não apenas os materiais envolvidos, mas também as condições dos ensaios, ambiente, rugosidade superficial e outros fatores relevantes, Figura 2.4.

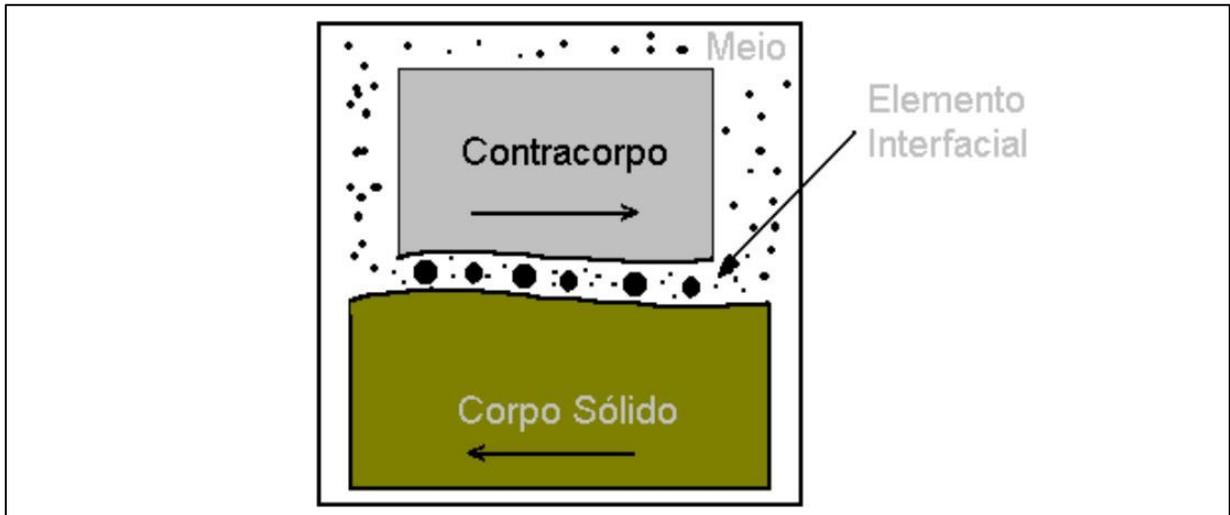


Figura 2.4: Esquema de um tribossistema.

Fonte: Site edisciplinas (2023).

Observa-se na Figura 2.4 que a estrutura de um tribossistema consiste em quatro elementos: corpo sólido, contra corpo, elemento interfacial e ambiente. Essa estrutura pode sofrer mudanças ao longo do tempo devido à ação do atrito e do desgaste. Essas mudanças podem afetar o comportamento do próprio sistema tribológico (ZUM GAHR, 1987).

O mesmo autor propõe que o corpo sólido e o contra corpo são os dois elementos principais que interagem entre si, gerando atrito e desgaste. O elemento interfacial refere-se à região de contato entre o corpo sólido e o contra corpo, onde ocorrem as interações tribológicas.

O ambiente compreende as condições externas ao sistema, como a presença de lubrificantes, óxidos, abrasivos, rugosidade superficial e outros fatores que influenciam nas propriedades tribológicas do sistema.

### 2.3 Considerações econômicas

Sinatora (2005) define a Tribologia como a aplicação da análise operacional dos problemas de confiabilidade, manutenção e desgaste de equipamentos técnicos, abrangendo desde a tecnologia aeroespacial até aplicações domésticas, com grande importância econômica.

O termo foi oficialmente citado pela primeira vez em 1966 em um relatório publicado pelo Departamento de Ciências e Educação da Grã-Bretanha, feito por H. Peter Jost para definir

“A ciência e tecnologia da interação entre superfícies em movimento relativo e das práticas com elas relacionadas”.

Além da introdução do termo "**Tribologia**", o relatório também se referiu pela primeira vez ao custo associado às falhas decorrentes dos fenômenos tribológicos. Em seu relatório, Jost apresentou estimativas que indicam que o uso do conhecimento existente poderia reduzir em 8.7% do total de energia mundial perdida por efeitos tribológicos (JOST, 1966).

De acordo com Holmberg et al. (2017), o consumo de energia desempenha um papel crucial na sociedade contemporânea. Quando há um alto atrito em um dispositivo, geralmente é necessário adicionar mais energia para superar essa resistência.

No entanto, a redução do atrito por meio da implementação de tecnologias tribológicas avançadas pode não apenas economizar energia, mas também reduzir as emissões globais de CO2.

O estudo feito por H. Peter Jost foi pioneiro ao tratar dos efeitos econômicos resultantes do atrito, desgaste e lubrificação de superfícies em diversos setores da indústria e tecnologia na Inglaterra, Jost evidenciou o quanto poderia ser economizado anualmente se os princípios da tribologia fossem corretamente aplicados, Figura 2.5 (DOWSON, 1979).

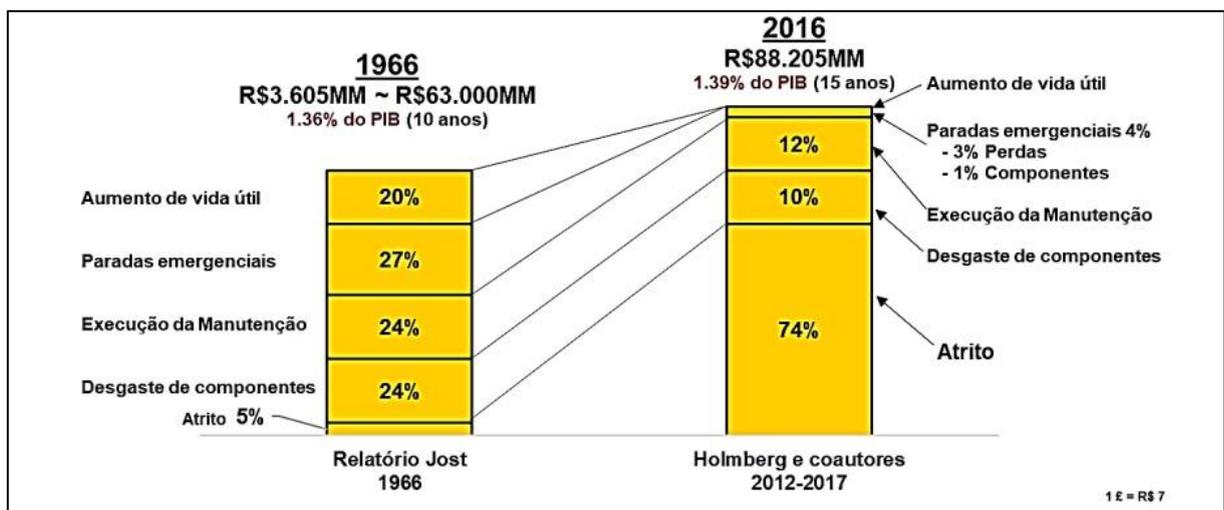


Figura 2.5: Potencial de economia com a implementação de novas técnicas tribológicas em máquinas e equipamentos na Inglaterra em 1966 e 2016.

Fonte: The impact of tribology on energy use and CO2 emission globally and in combustion engine and electric cars (2019)

Como pode ser observado na Figura 2.5 em 1966, o Relatório Jost concluiu que a implementação em larga escala da tecnologia tribológica poderia economizar 515 milhões de

libras esterlinas anualmente no Reino Unido após dez anos, equivalendo a 1,36% do PIB do país.

Cinquenta anos depois, mesmo com a tecnologia avançada já implementada, as economias potenciais ainda são de aproximadamente 1,39% do PIB global.

Isso se deve ao fato de que o atrito tinha um papel menor nas economias potenciais há cinquenta anos, representando apenas 5%, em comparação com os benefícios obtidos com a proteção contra desgaste, redução de custos com peças desgastadas, manutenção, falhas e aumento da vida útil.

Na Alemanha uma pesquisa realizada na década de 80 revelou que o atrito e desgaste juntos poderiam significar a perda de 4,5% do PIB de acordo com Zum Gahr (1987). Ambos o atrito e o desgaste representam desafios significativos para a indústria, pois podem levar a falhas mecânicas, custos de manutenção elevados e redução da eficiência dos sistemas.

Holmberg et al. (2017), destacou que cerca de 23% do consumo global de energia é atribuído a contatos tribológicos, dos quais 20% são utilizados para superar a ação do atrito e 3% são destinados à fabricação de componentes novos para substituir os desgastados.

## **2.4 Mecanismo de Desgaste**

Entende-se desgaste como a perda progressiva e contínua de material de um corpo, é o resultado da interação entre duas superfícies sólidas devido ao movimento relativo entre ambas. Essa definição enfatiza que o desgaste não se limita à remoção de material, podendo ocorrer apenas deformação plástica da superfície. Esses danos a superfícies podem levar a problemáticas secundárias como aumento da vibração, desbalanceamento e desalinhamento (ZUM GAHR , 1987).

De acordo com a norma DIN 50320, a definição de desgaste é caracterizada como a perda gradual de material de uma superfície sólida devido à ação mecânica, do contato e movimento relativo com outro corpo sólido, líquido ou gasoso.

Dessa definição podemos extrair três ideias importantes:

**Movimentação relativa:** A movimentação relativa entre as superfícies é importante para auxiliar na identificação e classificação dos tipos de desgaste, bem como dos fatores que podem acelerá-lo. A necessidade de movimento relativo entre as duas superfícies de contato e

a interação mecânica entre as asperezas são elementos essenciais do desgaste mecânico em comparação com outros processos semelhantes.

**Tipo de material:** O tipo de material é um fator relevante na identificação do tipo de desgaste e na determinação da severidade do desgaste em diferentes materiais. Algumas características do material, como dureza, tipo de carboneto e porcentagem de volume, podem ter um impacto decisivo na resistência ao desgaste em uma determinada aplicação.

Além disso a norma DIN 50320 descreve quatro mecanismos de desgaste, esses mecanismos são: abrasão, adesão, fadiga e reação triboquímica.

**Adesão:** Refere-se à formação e posterior rompimento de ligações adesivas interfaciais. Por exemplo, pode ocorrer em juntas soldadas a frio, onde ocorre a adesão inicial entre as superfícies.

**Abrasão:** Envolve a remoção de material por meio de sulcamento, corte, fadiga e trincamento. Isso ocorre quando há contato entre superfícies sólidas em movimento relativo, resultando na remoção de partículas do material.

**Fadiga mecânica:** É outro mecanismo de desgaste e envolve a formação de trincas em regiões da superfície devido a tensões cíclicas tribológicas. Essas tensões resultam na separação do material, levando ao desgaste.

**Reação triboquímica:** Quarto mecanismo descrito na norma e envolve a formação de produtos de reações químicas devido à interação química entre os elementos de um sistema em contato. Esse mecanismo é muitas vezes chamado de oxidação, pois a oxidação é geralmente o fator mais influente nesse processo.

Esses mecanismos de desgaste podem atuar isoladamente ou em conjunto, resultando em diferentes tipos de desgaste em materiais e componentes. É importante considerar esses mecanismos ao projetar e analisar sistemas tribológicos, a fim de entender e mitigar o desgaste.

## 2.5 Desgaste por adesão

Zum Gahr (1987) descreve a adesão como um fenômeno que ocorre quando duas superfícies entram em contato e são atraídas uma pela outra devido a forças atrativas. Essas forças podem ser influenciadas por diferentes tipos de ligações químicas, como ligações iônicas, covalentes, metálicas ou ligações de van der Waals. A intensidade dessas ligações depende da afinidade química entre os corpos que estão em contato.

Vários testes em uma grande variedade de metais têm mostrado que quando há forte adesão, ocorre transferência de material do metal mais fraco (ligações atômicas fracas) para o mais forte (ligações atômicas fortes), no caso do contato metal-metal (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2000), como ilustrado esquematicamente na Figura 2.6.

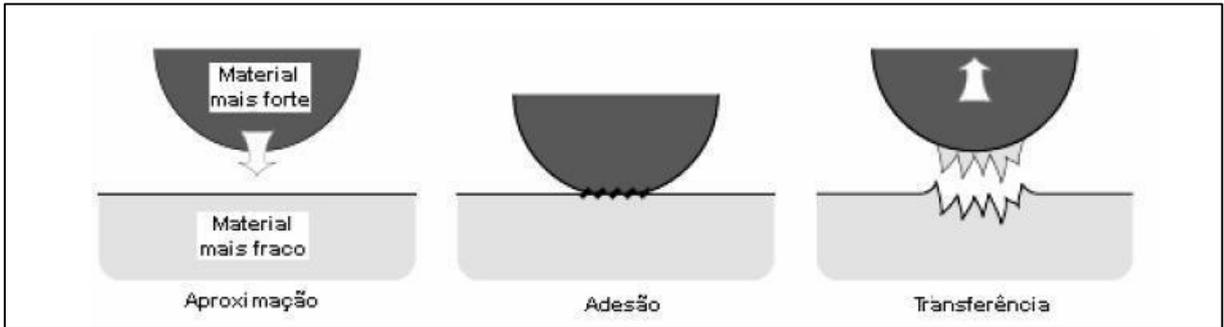


Figura 2.6: Processo de transferência de metal devido à adesão.

Fonte: STACHOWIAK; BATCHELOR, 2000

Segundo Juvinal e Marshek (1991), quando a pressão de contato e o aquecimento proveniente do atrito ficam concentrados em locais com pequenas áreas de contato as temperaturas e pressões locais são extremamente elevadas e as condições ficam favoráveis para que haja uma união por soldagem nesses pontos.

Caso ocorra fusão e soldagem das superfícies ásperas, ou a solda ou um dos metais perto da solda têm que falhar por cisalhamento para permitir que o movimento relativo entre as superfícies continue.

Novas soldagens e correspondentes fraturas continuam ocorrendo, o que resulta no que é chamado de desgaste por adesão, o qual pode ser melhor entendido na Figura 2.7.

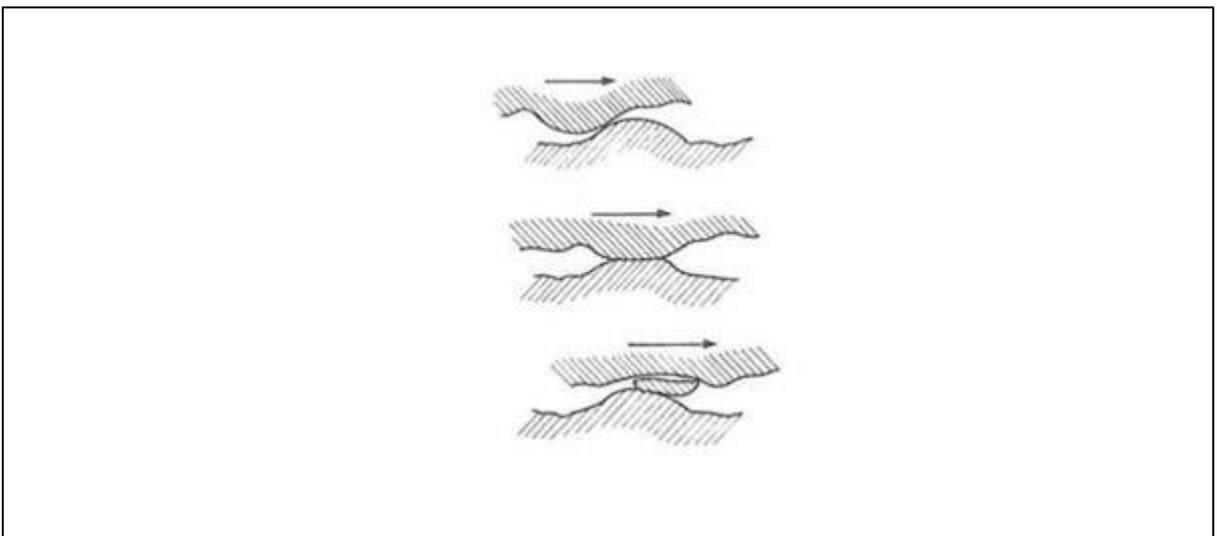


Figura 2.7: Transferência de material no desgaste por adesão.

Fonte: REVISTA FERRAMENTAL (2019).

Em alguns casos, um pedaço da peça A pode ser transferido para a peça B, resultando em rompimento superficial e danos à peça. Às vezes, uma partícula de um dos materiais pode ser quebrada e permanecer livre como escombros na interface, o que pode causar riscos e sulcos em ambas as peças. Esse tipo de dano é conhecido como "escoramento" ou "scuffing" da superfície, Figura 2.7 (NORTON, 2013).

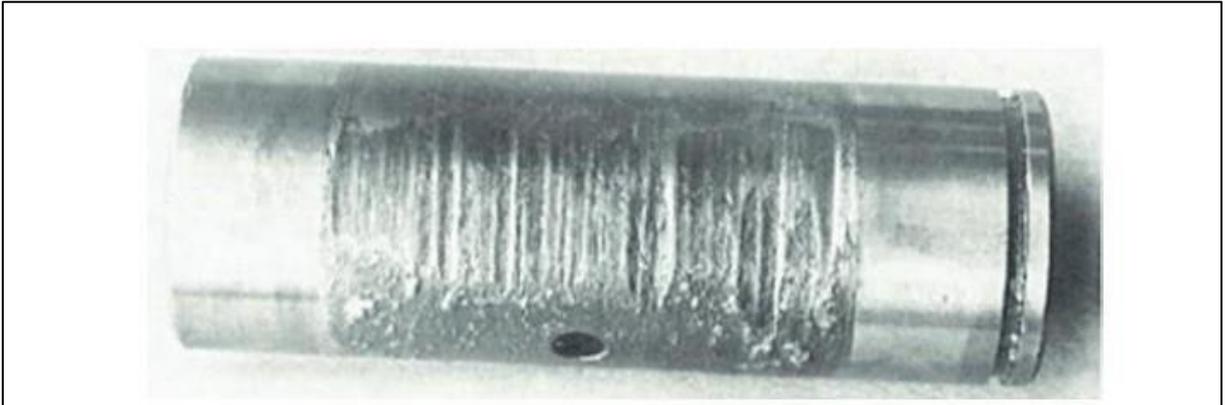


Figura 2.8: Desgaste por adesão em um eixo.

Fonte: D. J. Wulpi, Understanding How Components Fail. American Society for Metals: Metals Park, Ohio, 1990

Observa-se na Figura 2.8 um exemplo de um eixo que sofreu falha por desgaste por adesão devido à falta de lubrificação adequada.

A maioria das falhas de lubrificantes em contatos entre peças metálicas deslizantes ocorre devido ao desgaste adesivo, que acontece quando o lubrificante não consegue separar adequadamente as superfícies em movimento.

Conforme a sociedade internacional ASM Internacional (2001), e com base nos conhecimentos dos mecanismos do desgaste por adesão, equações foram desenvolvidas para descrever o fenômeno.

$$V = \frac{KSL}{3H} \quad (1)$$

Na equação mencionada, o fator K representa a probabilidade de fratura de uma área de contato específica dentro do material mais fraco em comparação com a interface original. A distância de deslizamento S é dada como parâmetro, enquanto V representa o volume do desgaste. Por fim, H é o limite de escoamento de recuo (dureza) da superfície mais macia.

## 2.6 Fatores de desgaste por adesão

Conforme Zum Gahr (1987), a adesão de materiais é influenciada por vários fatores, tais como resistência dos materiais, deformação plástica, estrutura do cristal e número de planos de escorregamento.

A tendência à adesão aumenta da estrutura hexagonal compacta para a estrutura cúbica de corpo centrado e para a estrutura cúbica de face centrada. Essas estruturas cristalinas possuem diferentes arranjos atômicos e características físicas, o que influencia a adesão entre materiais.

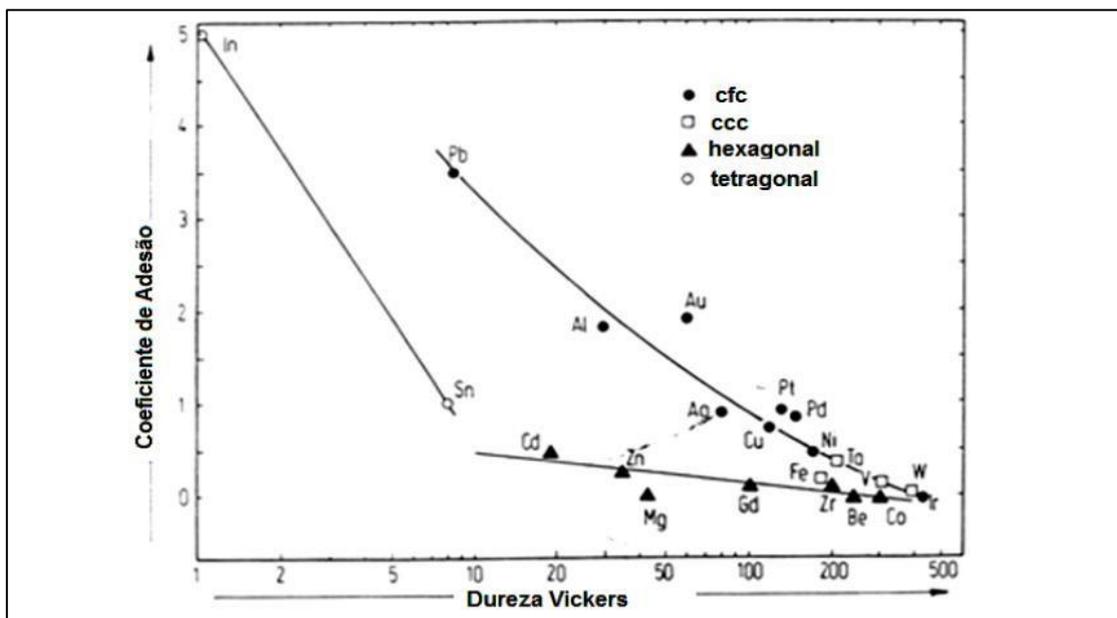


Figura 2.9: Influência da estrutura cristalina sobre o coeficiente de adesão e dureza.

Fonte: Zum Gahr (1987).

A Figura 2.9 demonstra como a estrutura cristalina afeta a adesão entre materiais e sua resistência à deformação. A adesão é um fenômeno complexo que depende das propriedades dos materiais envolvidos e de sua estrutura cristalina.

A adesão entre dois materiais pode ser também é influenciada pela sua compatibilidade metalúrgica. Quando dois metais possuem alta solubilidade mútua ou formam compostos intermetálicos, são considerados compatíveis (NORTON, 2013).

Rabinowicz, E. (1995) classifica os pares de materiais em categorias: idênticas, compatíveis, parcialmente compatíveis e incompatíveis, com base nesses critérios. Combinações idênticas e compatíveis não devem ser usadas em aplicações com deslizamento

não lubrificado. Já materiais das categorias incompatível e parcialmente compatível podem ser usados juntos, Figura 2.10.

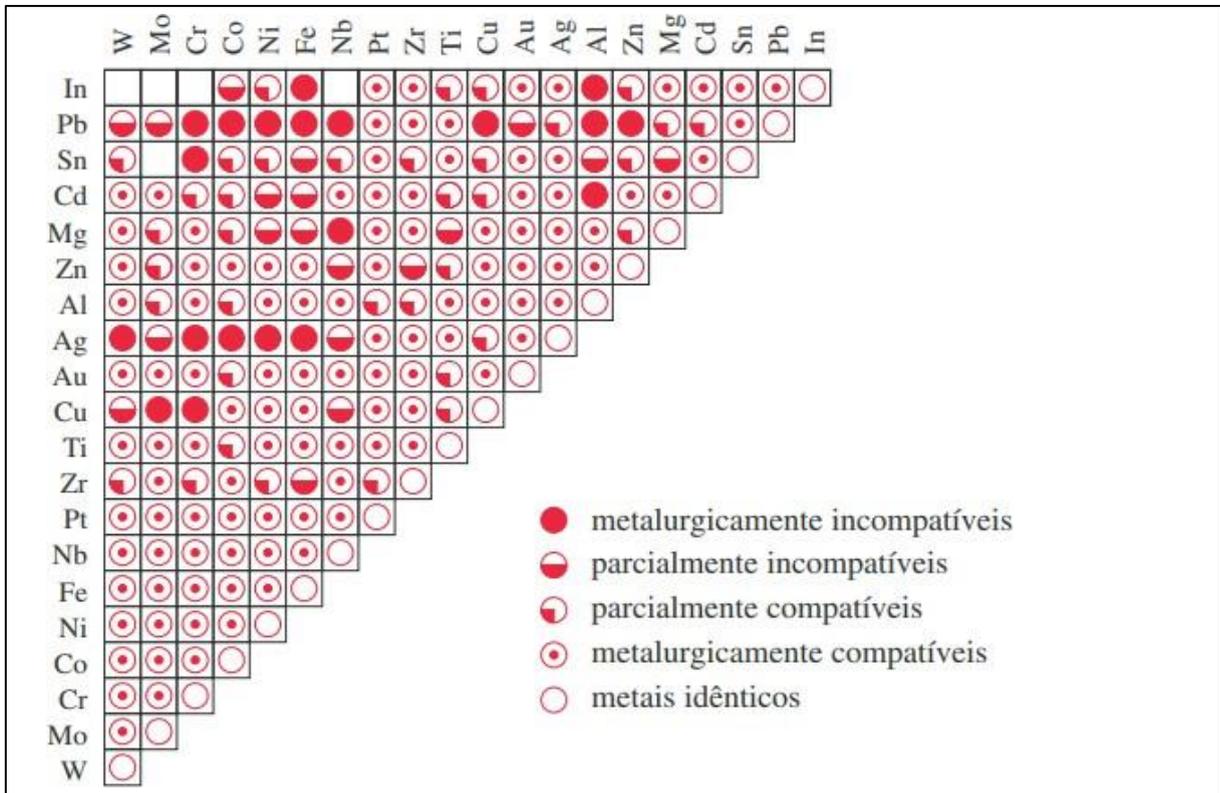


Figura 2.10: Diagrama de compatibilidade para pares de metais baseado em diagramas de fase binários.

Fonte: NORTON 2013.

Norton (2013) aborda uma série adicional de fatores que exercem influência sobre o fenômeno do desgaste por adesão, Figura 2.10.

**Contaminantes:** A adesão entre as asperezas requer superfícies limpas, sem óxidos, óleos ou umidade. Lubrificantes podem evitar a adesão entre materiais, mesmo se forem idênticos.

**Acabamento Superficial:** O desgaste por adesão pode ocorrer mesmo em superfícies com retificação fina.

**Soldagem a Frio:** Materiais metálicos limpos e compatíveis podem soldar-se a frio quando friccionados sob alta pressão. O processo pode ser aprimorado em vácuo para evitar oxidação.

**Escoriação (Galling):** A soldagem a frio incompleta, devido à contaminação, pode causar transferência de material entre as peças, arruinando a superfície.

## 2.7 Desgaste por abrasão

Zum Gahr (1987) define o desgaste por riscamento ou ranhuramento (grooving wear) como o desgaste causado pela penetração de partículas duras ou asperezas da superfície de um contracorpo duro em superfícies mais "moles" de um sólido durante o deslizamento.

O autor destaca que o desgaste abrasivo pode ocorrer quando partículas duras estão presentes entre duas superfícies em movimento relativo, ou quando essas partículas duras estão engastadas em uma ou ambas as superfícies em contato.

Essas partículas podem ser provenientes de resíduos de fabricação (como sílica), fragmentos de desgaste endurecidos ou partículas estranhas que entram no sistema de contato (poeira).

Em algumas situações, protuberâncias duras também podem se comportar como partículas duras, especialmente se a superfície do material oposto for mais "mole".

As classificações predominantes nas literaturas sobre o desgaste abrasivo são dadas em duas categorias principais :**Abrasão a dois ou três corpos** de acordo com a Figura 2.11.

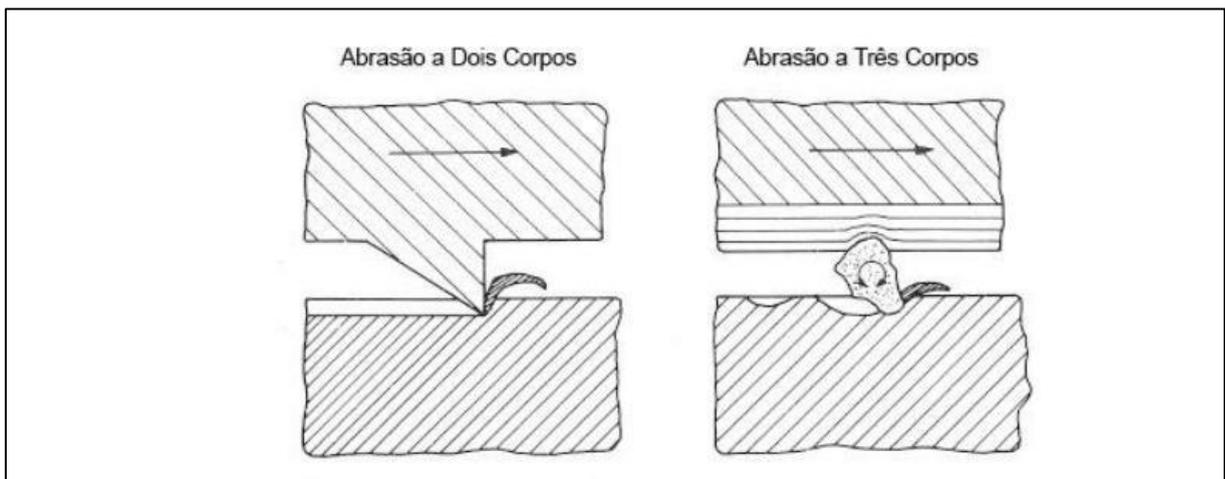


Figura 2.11: Exemplos de desgaste abrasivo a dois corpos e três corpos.

Fonte: Adaptado de Zum Gahr (1987).

Na abrasão a dois corpos Zum Gahr (1987) descreve que as partículas abrasivas estão firmemente aderidas a um dos corpos, o que resulta em riscos mais profundos no primeiro corpo durante o movimento relativo entre eles. Sendo pelo menos um dos dois corpos mais mole do que as partículas, Figura 2.11

O processo de desgaste a três corpos é conhecido como desgaste por rolamento, no qual as partículas duras têm a liberdade de rolar e deslizar entre as duas superfícies em contato (HUTCHINGS, 1992).

Conforme Zum Gahr (1987), o desgaste abrasivo pode ser classificado de acordo com o micro mecanismo de abrasão, como demonstrado na Figura 2.12.

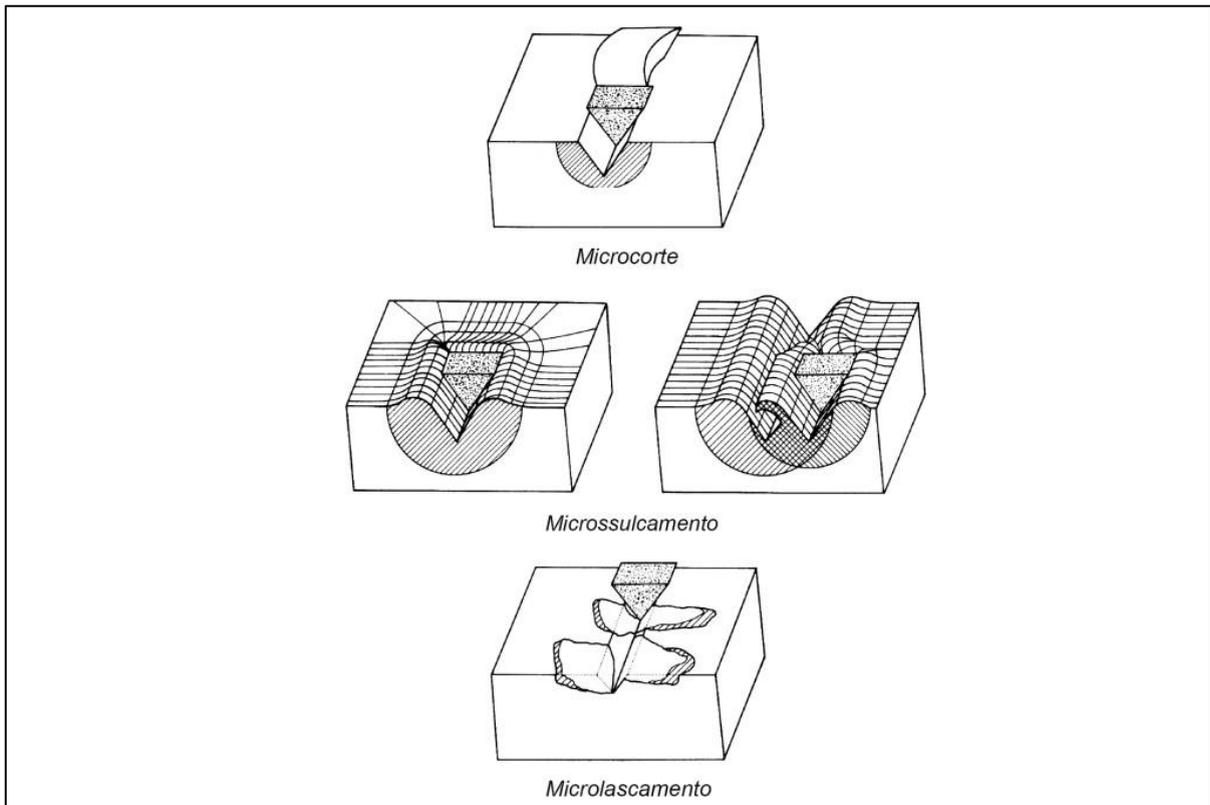


Figura 2.12: Mecanismos de desgaste envolvidos em desgaste abrasivo.

Fonte: Zum Gahr (1987).

**Microcorte:** Segundo Zum Gahr (1987), representa um modelo de uma “ponta” dura que corta uma superfície mole. Assim o volume do material removido é igual ao do sulco gerado pela passagem da partícula. Quando ocorre em um material de alta dureza, como materiais cerâmicos, trincas na superfície podem ocorrer, Figura 2.13 (STACHOWIAK E BATCHELOR, 2014).

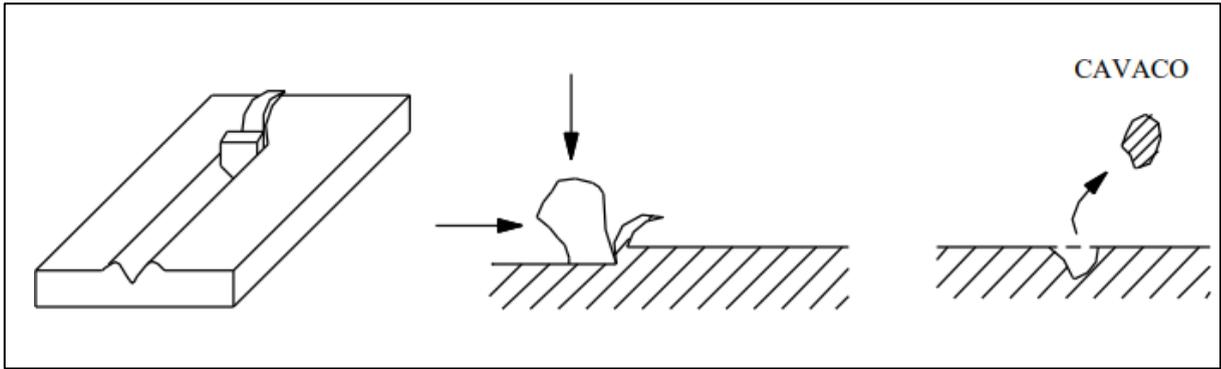


Figura 2.13: Esquema ilustrativo do micromecanismo de desgaste abrasivo por microcorte.

Fonte: Gregolin (1990)

**Microsulcamento:** Hutchings (1992) cita que durante o microsulcamento, a passagem de uma única partícula abrasiva não causa a remoção de material da superfície desgastada, mas forma um sulco sem perda de massa, Figura 2.14.

Devido a repetidas deformações no material, podem ocorrer a propagação de trincas. Quando essas trincas se encontram, ocorre a formação de micro-fragmentos de desgaste.

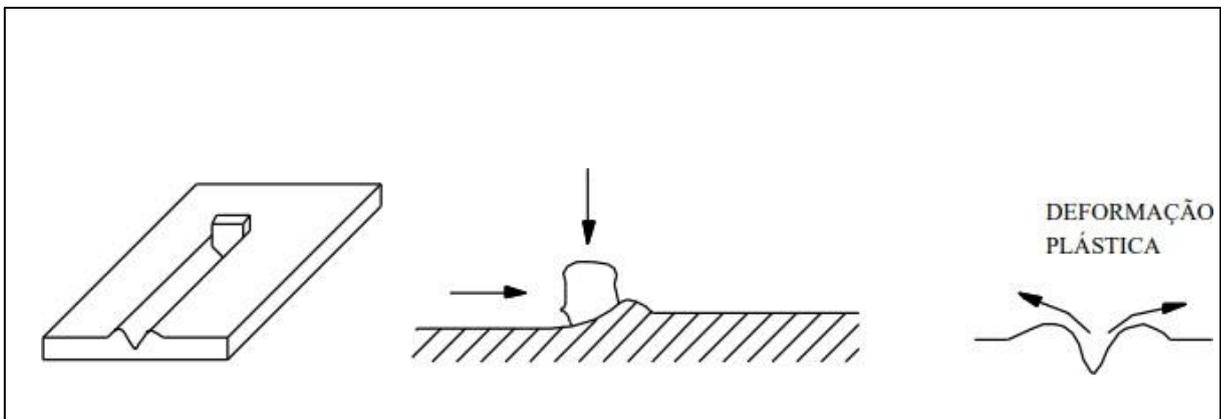


Figura 2.14: Esquema ilustrativo do micromecanismo de desgaste abrasivo por sulcamento.

Fonte: Gregolin (1990).’

**Micro-lascamento:** Ainda segundo Zum Gahr (1987), o mecanismo de microlascamento é marcado pela formação de grandes fragmentos desgastados.

Observa-se na Figura 2.15 que esse processo acontece quando o material está sob uma carga maior do que sua tensão crítica, o que leva à formação e propagação de trincas gerando o destacamento do material, mecanismo típico dos materiais frágeis

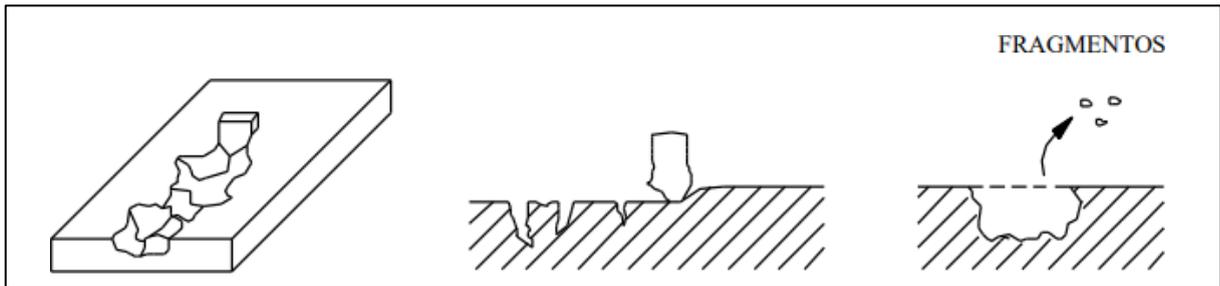


Figura 2.15: Esquema ilustrativo do micromecanismo de desgaste abrasivo por microtrincamento ou lascamento.

Fonte: Gregolin (1990).

Stachoviak e Batchelor (2001) afirmam que o desgaste abrasivo representa cerca de 50% dos tipos de desgaste e está presente em diversos campos da engenharia, como mineração, processamento de materiais, fabricação e desgaste de máquinas.

Zum Gahr (1987) destaca que o desgaste abrasivo em materiais dúcteis é dominado pelos mecanismos de sulcamento e micro-corte, sendo a proporção de material deslocado ou removido dependente do ângulo de ataque da partícula abrasiva, Figura 2.16.

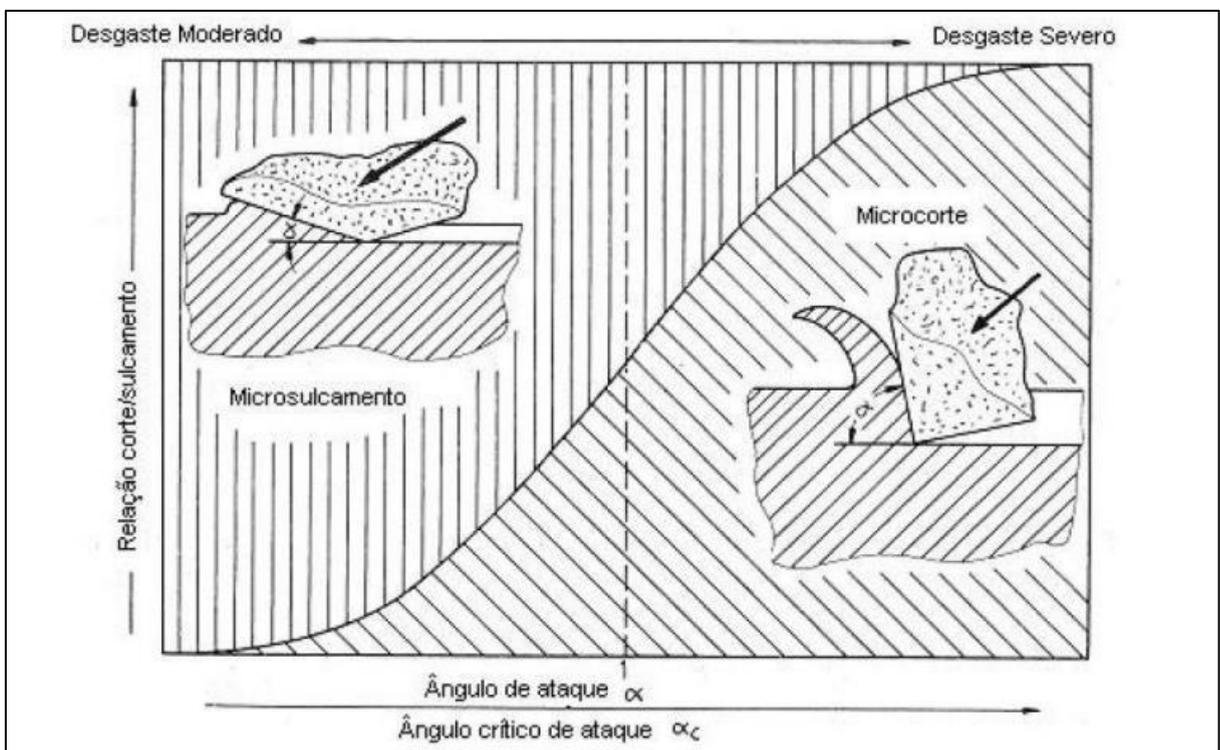


Figura 2.16: Relação entre corte e sulcamento como função da relação entre o ângulo de ataque e ângulo de ataque crítico.

Fonte: Zum Gahr (1987).

Em relação ao desgaste abrasivo, diversos fatores exercem influência significativa:

**Carga aplicada:** Estudos realizados por Zum Gahr (1987) e Hutchings (1987) demonstraram que a carga aplicada no contato tem uma relação direta com o desgaste por abrasão. Isso ocorre devido à maior profundidade de penetração das partículas abrasivas em superfícies mais macias.

**Dureza dos materiais:** De acordo com as pesquisas de Rabinowicz (1965), a dureza dos materiais apresenta uma relação inversa com o desgaste por abrasão. Ou seja, quanto maior a dureza superficial, menor será o desgaste abrasivo.

Essa propriedade pode ser obtida através de tratamentos térmicos ou termoquímicos. À medida que a dureza se aproxima da dureza das próprias partículas abrasivas, estas enfrentam maior dificuldade para cortar e tendem a se arredondar devido à quebra de seus gumes, resultando na redução do desgaste abrasivo.

**Geometria das partículas:** Hernandez (1997) descreve que partículas abrasivas com arestas mais agudas têm uma ação abrasiva mais intensa. Quando combinadas com impacto ou fortes pressões, essas partículas podem penetrar ainda mais profundamente nas superfícies, potencializando o desgaste abrasivo.

## 2.8 Desgaste por fadiga superficial

Zum Gahr (1987) menciona que o desgaste provocado por fadiga é caracterizado pela ocorrência de trincas e subsequente lascamento do material devido ao carregamento cíclico e repetitivo de superfícies sólidas.

Ainda seguindo o autor esse tipo de falha por fadiga superficial segue uma sequência de eventos que inclui deformação elástica, deformação plástica, encruamento, formação e propagação de trincas.

A fadiga superficial pode ser induzida por diversas ações, como rolamento, deslizamento e impacto de sólidos (ou líquidos), que geram tensões cíclicas nas superfícies.

Norton (2004) descreve que quando duas superfícies entram em contato por rolamento puro ou com uma pequena porção de deslizamento, ocorre um mecanismo de falha conhecido como fadiga superficial. Esse tipo de falha é comum em componentes mecânicos, como rolamentos, engrenagens e cilindros de laminação, Figura 2.17.

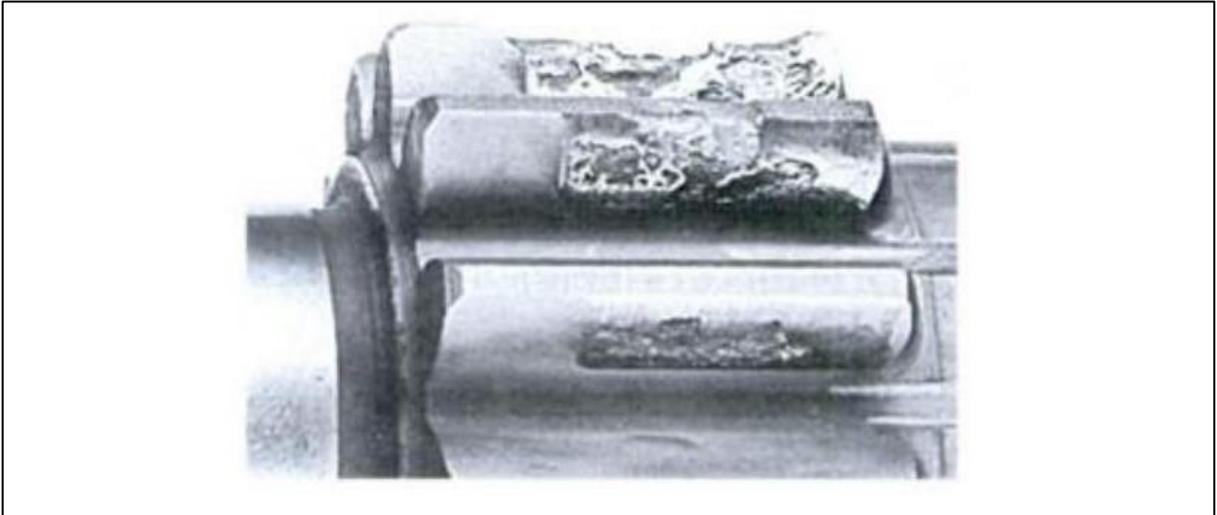


Figura 2.17: Crateração severa gerada por fadiga superficial nos dentes de uma engrenagem.

Fonte: Norton (2004)

Conforme a Figura 2.17 mostra as tensões geradas nesses contatos são altamente dependentes da geometria das superfícies, do carregamento aplicado e das propriedades do material, sendo o raio de curvatura das superfícies em contato um fator significativo

O desgaste por fadiga surge em condições específicas, como em componentes sujeitos a esforços elevados, rolamentos com pouco escorregamento e em situações de ausência ou limite de lubrificação.

Segundo Rabinowicz, E. (1995) esse tipo de desgaste ocorre por meio de fissuras de fadiga que podem se originar tanto na superfície de contato quanto no interior do sólido, abaixo da superfície de contato.

O autor propõe que os pontos de menor resistência, como defeitos estruturais no sólido na zona sub-superficial próxima das áreas de máxima tensão, são responsáveis pela formação das fissuras internas.

Sob solicitações, essas fissuras se propagam e se unem, resultando em fissuras de fadiga que crescem paralelamente à superfície. Quando atingem o comprimento crítico, ocorre a fratura perpendicular à superfície

## 2.9 Desgaste tribocorrosivo

O desgaste corrosivo é uma combinação de desgaste mecânico com processos químicos ou corrosivos. O termo "tribocorrosão" é utilizado para descrever a interação da corrosão eletroquímica com danos mecânicos (NORTON, 2013).

Quando uma peça está sob tensão em um meio corrosivo, ocorre a corrosão sob tensão, onde a combinação de tensão e meio corrosivo acelera o processo de corrosão (STOETERAU, 2004)

Da mesma forma a corrosão por fadiga ocorre quando a peça é tensionada ciclicamente em ambiente corrosivo, acelerando o crescimento de trincas (NORTON, 2013).

O primeiro estágio do desgaste por corrosão é o ataque corrosivo na superfície, seguido pela formação de um filme coeso que pode ou não proteger contra a reação química contínua, Figura 2.18 (STOETERAU, 2004).

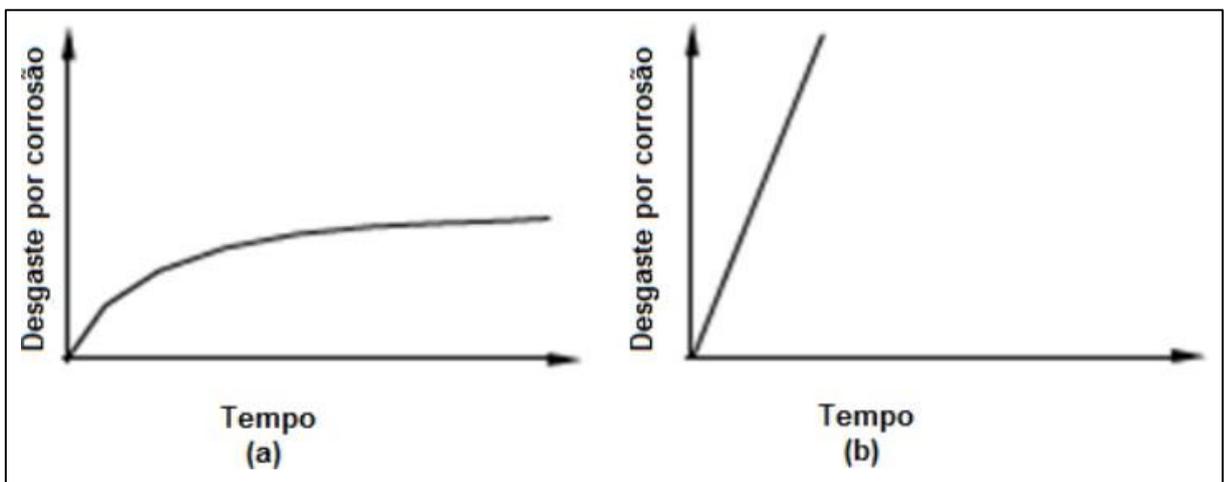


Figura 2.18:Relação corrosão com o tempo para (a) sistema em que se forma um filme protetor e (b) sistema em que não ocorre a formação do filme.

Fonte: Stoeterau (2004).

A magnitude da oxidação depende da interação entre a superfície e o meio, incluindo parâmetros como composição, reatividade do óxido com o meio, espessura, porosidade e fragilidade do óxido (BUCKLEY, 1981).

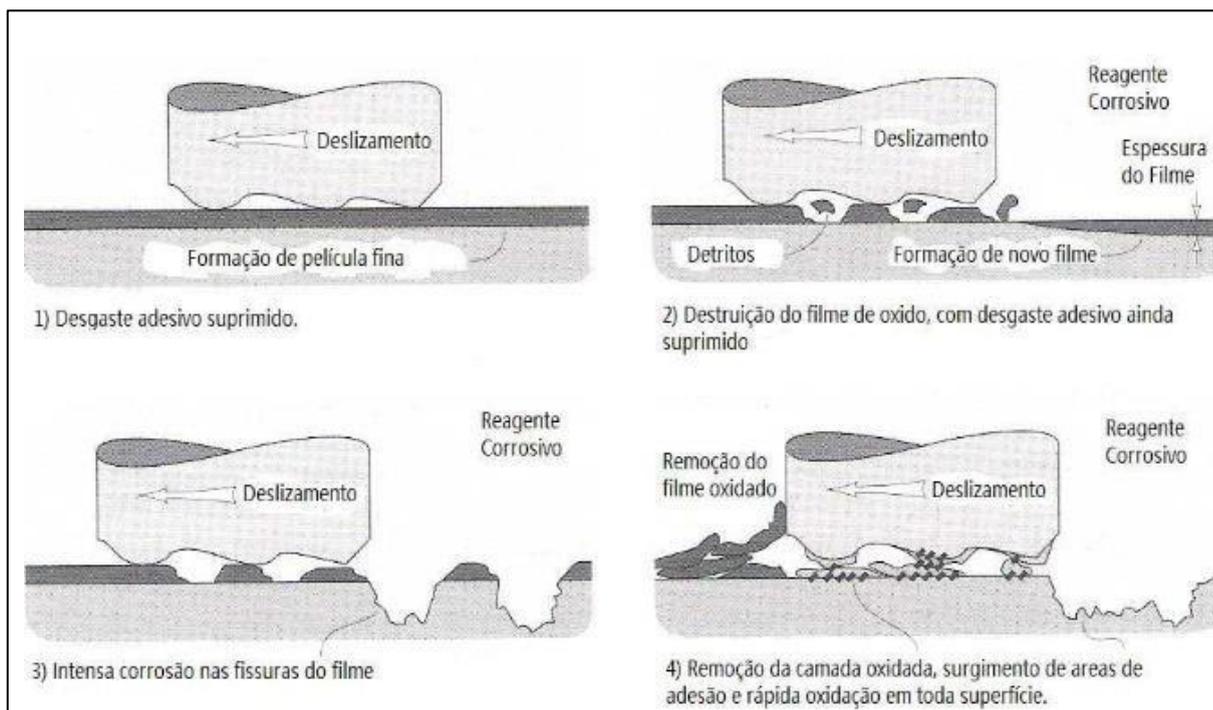


Figura 2.19: Camada oxidada removida por cisalhamento.

Fonte: Stachowiak e Batchelor ( 2014).

O desgaste corrosivo pode ocorrer por diferentes processos.

O primeiro processo envolve a formação de camadas duráveis de produtos de corrosão que atuam como películas lubrificantes, porém, raramente são duráveis o suficiente para proteger completamente os contatos desgastados do desgaste mecânico, Figura 2.19 (GARCIA, 2001).

Ainda segundo o autor o segundo processo é mais comum e relaciona-se à formação de películas de corrosão sacrificial ou de vida curta, removidas periodicamente em contatos deslizantes, Figura 2.19

O terceiro processo ocorre em ambientes altamente corrosivos, como a corrosão por pite ou galvânica, que interfere com o processo de repassivação, Figura 2.19

Já o quarto processo é limitado a ambientes extremamente corrosivos, onde os produtos de corrosão são fracos e solúveis em meios líquidos, Figura 2.19 (STACHOWIAK, 2014).

No mesmo sistema, é improvável que o desgaste e a corrosão possam ocorrer de forma totalmente independente, pois o calor, a agitação mecânica e a deformação resultantes do contato deslizante aceleram quase inevitavelmente o processo de corrosão.

## 2.10 Origem da Força De Atrito

O estudo do atrito teve suas origens no século XVI, quando Leonardo Da Vinci investigou e enunciou as leis do atrito seco. Contudo, somente no século XVII, essas leis foram experimentalmente confirmadas por Amontons, na França, sendo então conhecidas como as leis de Amontons. Posteriormente, Charles Augustin Coulomb, um físico francês, também contribuiu para o estudo do atrito e confirmou as três leis de Da Vinci-Amontons (ZUM GAHR, 1987).

Ainda segundo o autor atrito e desgaste não são propriedades inerentes aos materiais, mas sim atributos de um sistema. O atrito é a resistência ao movimento e surge das interações de sólidos em suas superfícies de contato real. Esses fenômenos são responsáveis pelas perdas de energia e material no sistema.

As Leis do Atrito podem ser declaradas como se segue:

- I. A força de atrito é proporcional à força normal;
- II. A força de atrito é independente da área de contato aparente.
- III. Para esta as vezes é adicionada uma terceira lei, frequentemente atribuída a Coulomb
- IV. A força de atrito independe da velocidade de deslizamento.

De acordo com Blau (2008), o coeficiente de atrito ( $\mu$ ) é uma medida da resistência ao movimento tangencial entre dois corpos quando estão pressionados juntos pela força normal. A força de atrito pode ser calculada usando a seguinte expressão.

$$F = \mu N \quad (2)$$

Ainda seguindo o autor, há dois tipos de atrito: estático e cinético (ou dinâmico). O atrito estático ocorre quando os corpos estão parados ou próximos de parar.

O coeficiente de atrito estático e pode ser encontrado através da equação 2 (BLAU, 2008).

$$F_s = \mu_s N \quad (3)$$

Enquanto o atrito cinético ocorre quando os corpos estão em movimento. O coeficiente de atrito estático ( $\mu_e$ ) é geralmente maior do que o coeficiente de atrito cinético ( $\mu_d$ ).

A força ( $F_k$ ) que se opõe ao movimento relativo e inicia o movimento é definida como força de atrito cinético ( $\mu k$ ). O coeficiente de atrito cinético e pode ser encontrado através da equação 4 (BLAU, 2008)

$$F_k = \mu k N \quad (4)$$

## 2.11 Características do Atrito

Existem duas classes de movimento relativo: de rolamento, que ocorre quando um corpo rola sobre uma superfície, típico de pares cinemáticos superiores, e o escorregamento, que acontece quando um corpo desliza sobre outro corpo, presente em pares cinemáticos inferiores. Em ambos os casos, é necessária uma força tangencial para mover o objeto sobre a superfície (HUTCHINGS, I. M., 2001).

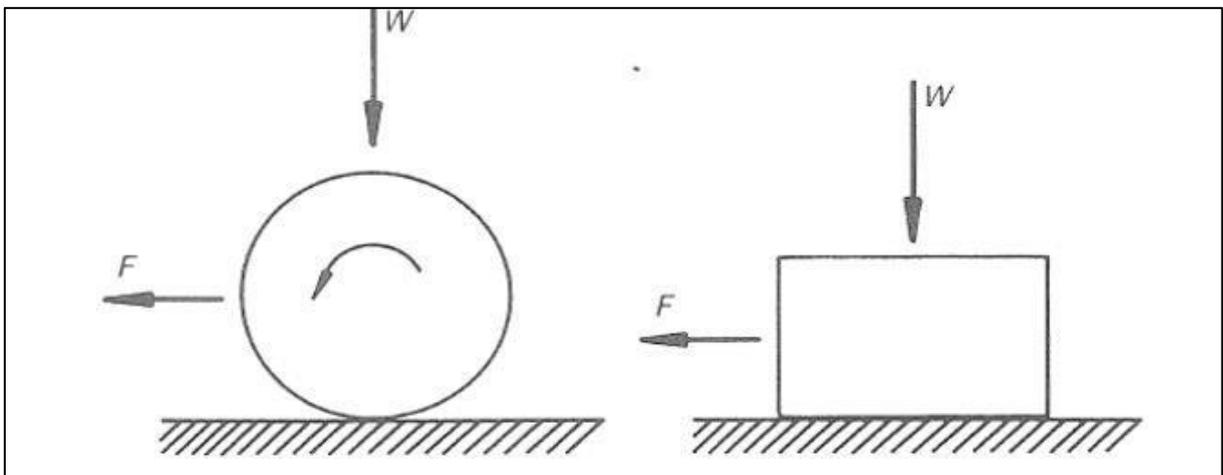


Figura 2.20: A força de atrito,  $F$ , é necessária para deslocar um objeto carregado por uma força normal,  $W$ .

Fonte: Tribology - Friction and Wear of Engineering Materials (1992).

O coeficiente de atrito é a relação entre a força de atrito e a carga normal, variando amplamente, desde valores baixos para rolamentos até valores elevados para superfícies metálicas polidas deslizando em vácuo, Figura 2.20 (HUTCHINGS, I. M., 2001).

A primeira lei do atrito, expressa como  $F = \mu W$

É válida para atrito seco e lubrificado, exceto para polímeros que fluem plasticamente e experimentam soldagem de asperezas locais (TYRKIEL, E., 1995).

A segunda lei, menos explorada, é válida para a maioria dos materiais, exceto polímeros (TYRKIEL, E., 1995).

Já a terceira lei observa que a força necessária para iniciar o deslizamento é maior do que para mantê-lo. Assim, temos o coeficiente de atrito estático ( $\mu_s$ ) e o coeficiente de atrito dinâmico ( $\mu_d$ ) (HUTCHINGS, I. M., 2001).

Norton (2013) apresenta uma série de situações que ilustram os efeitos do atrito em determinadas condições.

**Efeito da velocidade no atrito:** O atrito cinético de Coulomb é frequentemente considerado independente da velocidade de escorregamento, exceto em  $V = 0$ , onde há uma descontinuidade com um coeficiente de atrito estático maior.

No entanto, na realidade, o coeficiente de atrito ( $\mu$ ) diminui continuamente e de forma não linear com o aumento da velocidade ( $V$ ), mostrando uma relação próxima a uma reta quando plotado em relação ao logaritmo da velocidade.

Esse fenômeno ocorre porque altas velocidades aumentam a temperatura na interface, reduzindo o limite de resistência ao cisalhamento do material.

**Efeito de lubrificação no atrito:** A introdução de lubrificante na interface do deslizamento beneficia o coeficiente de atrito. Lubrificantes líquidos ou sólidos, de baixa resistência ao cisalhamento e alta resistência à compressão, reduzem o coeficiente de atrito.

O óleo derivado do petróleo, por exemplo, torna-se um material de menor resistência na interface devido ao seu baixo limite de cisalhamento, contribuindo para a redução do atrito.

Os lubrificantes também agem como contaminantes nas superfícies dos metais, formando uma camada que inibe a adesão, mesmo entre metais compatíveis.

Além disso, os lubrificantes ajudam a dissipar o calor da interface, o que reduz as interações de superfície e o desgaste.

## 2.12 Ensaio de Desgaste

Segundo o autor Garcia (20120), o desgaste de componentes industriais é uma preocupação importante devido à diminuição da vida útil e possíveis danos superficiais e alterações dimensionais.

Os ensaios de desgaste permitem simular a degradação acelerada de dispositivos, fornecendo informações sobre seu desempenho ao longo do tempo.

Os ensaios de desgaste por deslizamento são realizados para determinar a perda de material em contatos com áreas reduzidas. A máquina de teste realiza movimentos rotacionais ou circulares entre o disco e o pino, gerando um movimento discordante.

O resultado é a formação de um risco circular no disco, indicando o desgaste ocorrido.

### 2.13 Tribômetro

Existem diferentes tipos de tribômetros, como o tribômetro de atrito estático, que caracteriza interações com resistência ao movimento iminente, e o tribômetro de movimento deslizante (cinético), que compreende uma variedade de condições de operação, desde deslizamento unidirecional de velocidade constante até máquinas de articulação com uma série complexa de acelerações, desacelerações e mudanças de direção, Figura 2.21 (BLAU, 2008).

O tribômetro é um equipamento usado para medir quantidades tribológicas, como força de atrito, coeficiente de atrito e volume desgastado entre duas superfícies em contato. A sua origem remonta ao séc.XVII tendo sido inicialmente desenvolvida por Da Vinci.

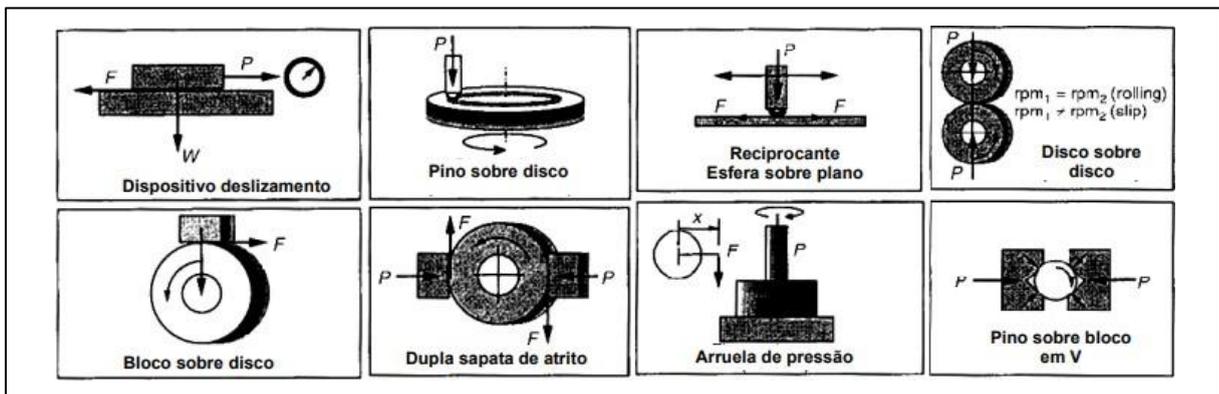


Figura 2.21:Exemplo de tribômetros usados para a medida do coeficiente de atrito.

Fonte: Adaptado de Blau (2008).

### 2.14 Método do pino sobre disco

Segundo Bayer (2004), o tribômetro Pino sobre disco é amplamente utilizado para estudos de atrito e desgaste. É o método mais conhecido e usado para determinar o desgaste causado pelo deslizamento entre diferentes materiais.

O ensaio pino-disco é um dispositivo em que um pino é pressionado contra a superfície de um disco em movimento circular sob a ação de uma carga normal aplicada. Durante a rotação, é observada a formação de uma pista circular de desgaste devido à carga

aplicada no pino. O ensaio também pode ser realizado com o pino em movimento de rotação enquanto o disco permanece parado (GARCIA, 2012).

O resultado deste ensaio é uma medida da perda de massa do corpo de prova ao longo do tempo. Esta medida é obtida comparando a massa inicial e final do material que foi desgastado. Com os resultados obtidos é possível determinar a distância percorrida, o coeficiente de desgaste e a resistência ao desgaste (OLIVEIRA, 2016).

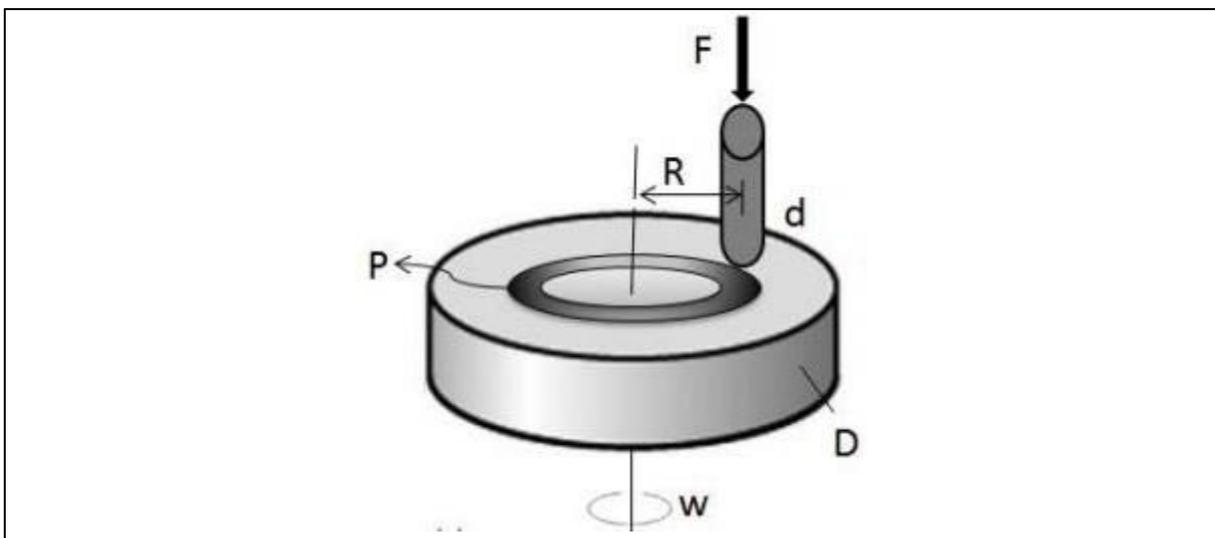


Figura 2.22:Esquema do sistema de teste de desgaste pino-disco.

Fonte: Oliveira (2016).

A Figura 2.22 mostra os parâmetros do sistema pino-disco, incluindo a força normal ( $F$ ) sobre o pino, o diâmetro do pino ou esfera ( $d$ ), o diâmetro do disco ( $D$ ), o raio da pista de desgaste ( $R$ ), a velocidade de rotação do disco ( $W$ ) e o caminho percorrido pelo pino sob o disco onde ocorreu o desgaste, representando a perda de material.

O tribômetro deve realizar testes padronizados de pino sobre disco e de movimento linear em conformidade com as normas ASTM G99.

## 2.15 Norma ASTM G99

A norma ASTM G99 é um padrão internacional amplamente utilizado para a realização de testes de desgaste e atrito utilizando a configuração de pino sobre disco. Essa norma estabelece diretrizes para a realização de ensaios tribológicos, garantindo que os resultados sejam consistentes, confiáveis e reproduzíveis.

Neste tópico, serão abordados os principais aspectos da norma, incluindo os requisitos de projeto que um tribômetro deve atender para estar em conformidade com a ASTM G99.

## **2.16 Resumo da Norma ASTM G99**

A ASTM G99 descreve o procedimento para realizar testes de desgaste e atrito utilizando a configuração de pino sobre disco. O teste consiste em aplicar uma carga normal sobre um pino (ou corpo de prova) que é pressionado contra um disco em movimento rotativo. O objetivo é medir a taxa de desgaste e o coeficiente de atrito entre os dois materiais em contato.

A norma é aplicável a uma ampla variedade de materiais, incluindo metais, cerâmicas, polímeros e compósitos, e pode ser utilizada para avaliar o desempenho de materiais em diferentes condições de carga, velocidade e ambiente.

### **Principais Itens que um Tribômetro deve conter de acordo com a ASTM G99**

Para estar em conformidade com a ASTM G99, um tribômetro deve atender aos seguintes requisitos:

#### **Sistema de Aplicação de Carga:**

O equipamento deve ser capaz de aplicar uma carga normal controlada e precisa sobre o pino. A carga deve ser ajustável e mantida constante durante o teste.

A norma recomenda o uso de um sistema de carga com precisão de  $\pm 1\%$  do valor aplicado.

#### **Movimento Rotativo do Disco:**

O disco deve ser capaz de girar em velocidades controladas e constantes. A velocidade de rotação deve ser ajustável e medida com precisão.

A norma sugere que a velocidade seja mantida dentro de uma tolerância de  $\pm 2\%$  do valor desejado.

#### **Medição de Força de Atrito:**

O tribômetro deve incluir um sistema para medir a força de atrito entre o pino e o disco. Isso pode ser feito utilizando uma célula de carga ou outro sensor de força.

A precisão da medição da força de atrito deve ser de  $\pm 1\%$  do valor medido.

### **Controle de Temperatura e Ambiente:**

A norma recomenda que o equipamento permita o controle da temperatura e do ambiente durante o teste. Isso é particularmente importante para simular condições reais de operação.

O uso de uma câmara ambiental ou sistema de aquecimento/resfriamento é sugerido para testes em condições específicas.

### **Sistema de Coleta de Dados:**

O tribômetro deve incluir um sistema para coletar e registrar dados em tempo real, como carga normal, força de atrito, velocidade de rotação e temperatura.

A norma recomenda que os dados sejam armazenados com uma frequência de aquisição adequada para capturar variações durante o teste.

### **Geometria e Dimensões dos Corpos de Prova:**

A ASTM G99 especifica as dimensões recomendadas para o pino e o disco. O pino deve ter uma superfície de contato plana e circular, enquanto o disco deve ser plano e uniforme.

As dimensões exatas dependem do tipo de teste, mas a norma fornece diretrizes claras para garantir a reprodutibilidade dos resultados.

### **Requisitos de Projeto de um Tribômetro de Acordo com a ASTM G99**

Para garantir que um tribômetro esteja em conformidade com a ASTM G99, os seguintes requisitos de projeto devem ser respeitados:

#### **Precisão e Calibração:**

Todos os sistemas de medição (carga, força de atrito, velocidade e temperatura) devem ser calibrados regularmente para garantir precisão e confiabilidade.

A norma recomenda a utilização de padrões de calibração reconhecidos internacionalmente.

#### **Rigidez Estrutural:**

O equipamento deve ser projetado com rigidez suficiente para evitar vibrações ou deformações durante o teste, o que poderia afetar os resultados.

Materiais de alta resistência, como aço carbono ou alumínio de alta qualidade, são recomendados para a estrutura do tribômetro.

### **Facilidade de Montagem e Troca de Corpos de Prova:**

O tribômetro deve permitir a fácil montagem e troca dos corpos de prova (pino e disco) para agilizar a realização dos testes.

A norma sugere o uso de sistemas de fixação rápidos e precisos, como parafusos ou pinos de alinhamento.

### **Segurança Operacional:**

O equipamento deve incluir mecanismos de segurança, como proteções para o disco em movimento e sistemas de desligamento automático em caso de falha.

A norma enfatiza a importância de garantir a segurança do operador durante o uso do tribômetro.

### **Compatibilidade com Software de Análise:**

O sistema de coleta de dados deve ser compatível com softwares de análise que permitam o processamento e a interpretação dos resultados de acordo com as diretrizes da ASTM G99.

A norma recomenda a utilização de softwares que gerem relatórios detalhados, incluindo gráficos de desgaste e coeficiente de atrito ao longo do tempo.

Tabela 2.1: Tribômetros e mecanismos de desgaste.

| Nome do ensaio                                     | Norma       | Processo realizado                          | Mecanismo de desgaste                        | Tipo do atrito realizado               |
|--|-------------|---|--|--|
| Pino sobre disco                                   | ASTM G99    | Medida do desgaste por deslizamento         | Desgaste adesivo, desgaste Tribo-oxidativo.  | Seco e lubrificado                     |
| Bloco - disco                                      | ASTM G77    | Medida do desgaste por deslizamento         | Desgaste adesivo, desgaste Tribo-oxidação    | Seco                                   |
| Bloco - disco                                      | ASTM D 2714 | Medida do coeficiente de atrito lubrificado | Desgaste Tribo-oxidação                      | lubrificado                            |
| Disco sobre disco                                  | -           | Medida do desgaste por rolamento deslizante | Fadiga por contato, aderência tribo-oxidação | Seco e lubrificado                     |
| 4 esferas  | D 5183 – 05 | Desgaste por rolamento                      | Fadiga por contato                           | Coefficiente de atrito do lubrificante |
| Teste de abrasão de pinos                          |             | Abrasão em alta tensão                      | Desgaste do abrasivo                         | Seco                                   |
| Teste de desgaste de roda de borracha e areia seca | ASTM G65    | Desgaste abrasivo em baixa tensão           | Desgaste do abrasivo                         | Seco                                   |
| Linear recíprocante esfera sobre plano             | ASTM G133   | Desgaste por deslizamento                   | Desgaste adesivo, desgaste Tribo-oxidativo.  | Seco e lubrificado                     |

Fonte: Adaptado de Straffelini (2015) e Blau (2008)

CHLUM. et al (2010), descreve que o teste de desgaste pino-sobre-disco (ASTM G99) e teste de desgaste linear recíprocante (ASTM G133) são dois métodos padronizados para avaliar o desgaste de materiais, Tabela 2.1.

No teste pino-sobre-disco, uma amostra com um pino pontiagudo esférico gira ao redor de outra amostra em forma de disco, criando um caminho de desgaste circular.

Já no teste de desgaste linear recíprocante, uma amostra com uma ponta esférica desliza para frente e para trás ao longo de um caminho linear em uma placa plana. Ambos os testes requerem a aplicação de força para pressionar a amostra de pino contra a amostra de disco ou placa, e as forças laterais resultantes são medidas para calcular o coeficiente de atrito.

De acordo com Wainner et al. (1992), o aumento na velocidade de deslizamento resulta em um aumento no volume de material removido por abrasão. Esse aumento é atribuído ao

aquecimento da superfície causado pelo atrito das partículas abrasivas, o que leva a uma diminuição nas propriedades mecânicas do material.

A perda de material por abrasão no ensaio está diretamente relacionada à força de compressão entre o abrasivo e a superfície, gerada pela carga aplicada no sistema. Aumentar a carga sobre o material resulta em um aumento no desgaste abrasivo. No entanto, essa relação é válida apenas até o valor crítico de força, quando o material começa a fraturar.

## **2.17 Análise da NR 12 e sua Aplicação no Projeto do Tribômetro**

A Norma Regulamentadora 12 (NR 12) é um dos principais instrumentos normativos da legislação brasileira de segurança no trabalho, estabelecendo requisitos técnicos obrigatórios para máquinas e equipamentos. Publicada pelo Ministério do Trabalho e Emprego, esta norma tem como objetivo principal garantir a integridade física dos trabalhadores através da prevenção de acidentes em equipamentos com partes móveis.

A NR 12 apresenta um caráter abrangente, aplicando-se a todas as fases do ciclo de vida útil dos equipamentos, desde o projeto e fabricação até a operação, manutenção e eventual desativação. Seu escopo inclui dispositivos de proteção coletiva, sistemas de segurança, requisitos para instalações e procedimentos operacionais seguros.

Dentre os princípios fundamentais estabelecidos pela norma, destacam-se:

- A obrigatoriedade de proteções que impeçam o acesso às zonas perigosas
- A necessidade de sistemas de comando que garantam paradas seguras em situações de emergência
- A exigência de sinalização adequada de todos os riscos remanescentes
- A previsão de medidas especiais para manutenção e limpeza

### **2.17.1 NR 12 e sua aplicação no tribômetro pino sobre disco**

No desenvolvimento do tribômetro pino-disco, a NR 12 foi considerada, resultando em um projeto que atende aos requisitos de segurança estabelecidos pela norma. A aplicação prática dos preceitos normativos se deu através de diversas medidas específicas:

### **Dispositivos de Segurança:**

Foram instalados dois botões de parada de emergência em posições estratégicas, atendendo ao princípio de redundância. O sistema de acionamento incorpora proteções contra sobrecarga e sobrevelocidade, com sensores que desativam automaticamente o equipamento em caso de anomalias operacionais.

### **Aspectos Construtivos:**

O projeto atendeu rigorosamente às distâncias de segurança estabelecidas pela norma, mantendo zonas de perigo fora do alcance normal do operador. Todos os cantos e bordas foram arredondados (raio mínimo de 3mm) e as superfícies de contato receberam tratamento antiderrapante.

### **Segurança Elétrica:**

O projeto elétrico seguiu os requisitos para equipamentos classe I, com:

- Isolamento adequado de todas as partes energizadas
- Proteção contra surtos e curtos-circuitos

A implementação da NR 12 no projeto do tribômetro resultou em um equipamento que atende plenamente aos requisitos de segurança, demonstrando que é possível conciliar desempenho técnico e proteção dos operadores. Todas as medidas adotadas foram validadas através de simulações computacionais e análise de riscos, comprovando sua eficácia na redução dos perigos inerentes à operação do equipamento

A implementação dos princípios da NR 12 no desenvolvimento do tribômetro buscou conciliar as exigências de segurança com os objetivos técnicos do equipamento. Embora não tenha sido possível incorporar integralmente todos os dispositivos previstos na norma devido às características específicas do projeto, foram adotadas as principais medidas de proteção para garantir condições seguras de operação.

O projeto considerou os aspectos mais relevantes da NR 12, priorizando:

- As proteções mecânicas essenciais para as partes móveis críticas
- Os dispositivos de segurança fundamentais para operação segura
- Os requisitos básicos de sinalização e ergonomia

A análise de riscos realizada demonstra que as medidas implementadas são eficazes para controlar os principais perigos identificados, embora reconheça-se que algumas recomendações

complementares da norma não tenham sido integralmente atendidas em função das particularidades do equipamento e de suas condições operacionais específicas.

Esta abordagem se mostrou adequada para o protótipo desenvolvido, garantindo um nível satisfatório de segurança dentro dos parâmetros técnicos e orçamentários estabelecidos para o projeto. Ressalta-se, contudo, que para uma versão comercial do equipamento, seria recomendável uma implementação mais abrangente dos dispositivos previstos na NR 12.

## **2.18 Projetos Mecânicos**

Projetos mecânicos envolvem a aplicação de conhecimentos de física, resistência dos materiais e cinemática para desenvolver sistemas funcionais, seguros e eficientes. No contexto de um tribômetro pino-disco, os critérios essenciais incluem:

Análise de Esforços:

- Cálculo de torque, forças normais e tensões mecânicas nos componentes.

Exemplo: A estrutura deve suportar cargas estáticas (peso) e dinâmicas (vibrações do motor).

Seleção de Materiais:

- Propriedades como dureza, módulo de elasticidade e resistência ao desgaste (ex.: aço SAE 1020 para a mesa, AISI 52100 para o disco).

Precisão Dimensional:

- Tolerâncias geométricas (ex.: alinhamento pino-disco  $\leq \pm 0,1$  mm) para garantir repetibilidade nos ensaios.

Normas Técnicas:

- Conformidade com ASTM G99 (ensaio pino-disco) e NR-12 (segurança mecânica).

## **2.19 Fundamentação Teórica para o Projeto do Tribômetro Pino-Disco**

O desenvolvimento do tribômetro pino-disco foi embasado em princípios fundamentais da mecânica e tribologia, que fornecem o suporte teórico necessário para o dimensionamento e análise do equipamento. A fundamentação teórica apresentada a seguir estabelece as bases científicas que justificam as escolhas de projeto e os cálculos realizados.

A mecânica dos sólidos constitui o primeiro pilar teórico, com ênfase na aplicação das Leis de Newton para análise estática e dinâmica do sistema. O equilíbrio de forças e momentos foi considerado no dimensionamento da estrutura, particularmente no cálculo dos esforços atuantes nos componentes principais, enquanto os critérios de resistência dos materiais asseguraram que todos os elementos mecânicos operassem dentro de suas tensões admissíveis.

No campo da tribologia, os princípios básicos do atrito e desgaste foram essenciais para o projeto. A Lei de Coulomb para atrito seco ( $F_{at} = \mu \cdot F_n$ ) fundamentou o cálculo das forças tangenciais, enquanto a teoria de Hertz permitiu estimar as pressões de contato entre o pino e o disco.

A compreensão dos mecanismos fundamentais de desgaste, incluindo os modos adesivo e abrasivo, orientou a seleção dos materiais para os corpos de prova. Além disso, a influência da rugosidade superficial, quantificada pelo parâmetro Ra, foi considerada para garantir a qualidade das superfícies em contato.

A dinâmica rotacional completou o arcabouço teórico, com destaque para as relações entre torque, potência e velocidade angular, essenciais para o dimensionamento do sistema de acionamento. O cálculo do momento de inércia dos componentes rotativos e a análise da transmissão de movimento foram cruciais para garantir o desempenho operacional do equipamento dentro das faixas de carga e velocidade especificadas.

Esta integração de conceitos teóricos permitiu:

1. O dimensionamento adequado dos componentes críticos, como eixo e estrutura principal
2. A seleção criteriosa dos materiais para discos e pinos
3. A previsão confiável do comportamento operacional em diversas condições de ensaio
4. A garantia de precisão nas medições tribológicas

A correta aplicação destes fundamentos assegurou que o tribômetro projetado atendesse plenamente aos requisitos da norma ASTM G99, proporcionando dados confiáveis sobre coeficiente de atrito e taxas de desgaste para diversos pares de materiais. A consistência teórica do projeto reforça sua validade científica e sua aplicabilidade prática em pesquisas tribológicas futuras.

### **3 METODOLOGIA**

#### **3.1 Tipo de pesquisa**

De acordo com Gil (2007), a pesquisa é um procedimento racional e sistemático com o propósito de solucionar problemas propostos. Esse processo envolve várias etapas, desde a formulação do problema até a apresentação e discussão dos resultados.

Para Ander-Egg (1978), a pesquisa é um procedimento sistemático, controlado e crítico que busca descobrir novos fatos ou leis em diferentes áreas do conhecimento. É um processo formal que requer métodos reflexivos e um tratamento científico, visando compreender a realidade ou descobrir verdades parciais.

A pesquisa é um estudo que aborda um tema específico e segue uma metodologia rigorosa, analisando o assunto em todos os aspectos relevantes, de acordo com Marconi e Lakatos (2003). A pesquisa deve ter um valor representativo significativo e pode ser realizada em diferentes âmbitos, dependendo de seus objetivos.

Com base nisso obtém-se os objetivos da pesquisa que determina a sua classificação. Dessa forma, a presente pesquisa se enquadra nos seguintes estudos: quantitativa, bibliográfica e experimental.

Conforme Marconi e Lakatos (2021), a pesquisa quantitativa é uma investigação que utiliza as regras da Lógica, especialmente do raciocínio dedutivo, para derivar hipóteses a serem testadas a partir da teoria.

A pesquisa quantitativa busca a objetividade ao analisar dados brutos coletados por meio de instrumentos padronizados e neutros. Ela utiliza a linguagem matemática para descrever as causas de fenômenos e as relações entre variáveis.

A abordagem bibliográfica é essencial para embasar o projeto, permitindo a revisão sistemática da literatura relacionada aos princípios de funcionamento, aplicações e desenvolvimento de tribômetros. Nesse contexto, o estudo bibliográfico ajuda a contextualizar o trabalho, apoiar as decisões de projeto e fundamentar a relevância do tema.

Por fim, a pesquisa experimental assume um papel central, já que o projeto de TCC tem como objetivo o projeto mecânico com auxílio de programa *CAD*. Poderão ser realizadas simulações com o protótipo para avaliar seu desempenho, testar hipóteses e validar os resultados obtidos.

### 3.2 Materiais e Métodos

Antes de iniciar o projeto, são definidas as funções do tribômetro pino-disco, abrangendo a zona de movimento e suas fixações, a forma de aplicação de carga no ensaio e os dados a serem adquiridos, distância ao centro de rotação, força aplicada, velocidade de rotação e temperatura.

Em seguida, o projeto do tribômetro deve ser elaborado com base em pesquisa bibliográfica detalhada sobre princípios de funcionamento, materiais adequados, métodos de ensaio e padrões internacionais como a norma ASTM G99.

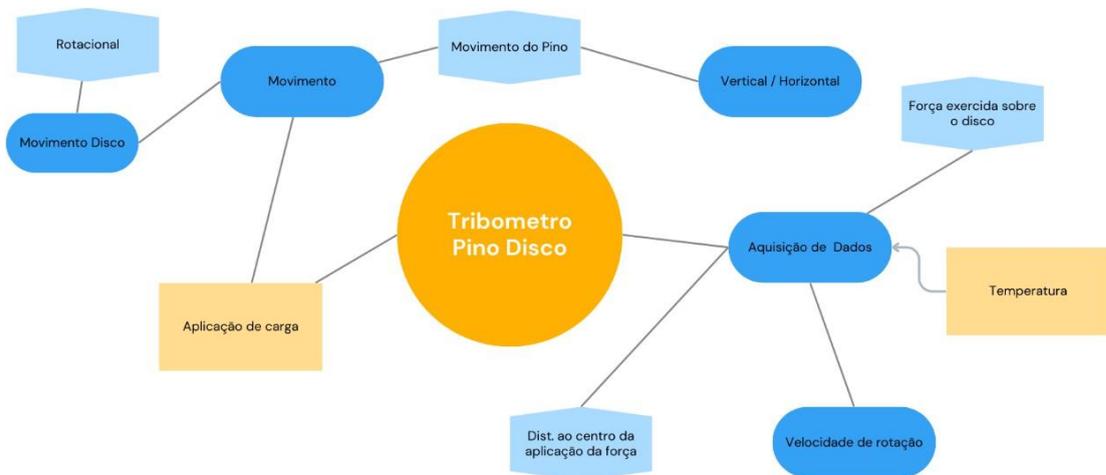


Figura 3.1: Definição funções Tribômetro.

Fonte: Pesquisa direta (2025).

A Figura 3.1 ilustra um diagrama esquemático dos principais pontos para funcionamento de um dispositivo tribômetro pino-disco.

O fluxograma representado na Figura 3.2 descreve a sequência de etapas abordando as principais etapas do trabalho.



Figura 3.2: Planejamento dos passos para projeto mecânico de dispositivo pino sobre disco.

Fonte: Pesquisa direta (2025).

A norma *ASTM G99* (2004) estabelece os fatores que devem ser controlados e as especificações dos componentes para garantir a eficácia do ensaio de desgaste em um tribômetro do tipo pino-disco. Esses fatores incluem a carga aplicada, velocidade e distância de deslizamento entre as faces em contato, bem como a temperatura e o ambiente.

Primeiramente, é realizada uma revisão abrangente análise detalhada da norma *ASTM G99*, que descreve o método de teste para ensaio de desgaste em tribômetros do tipo pino-disco. Nessa revisão, serão identificados os parâmetros de teste, condições de operação e os requisitos para a realização do ensaio de forma padronizada e confiável.

Na segunda etapa será elaborado o projeto do tribômetro utilizando o software *CAD* (*Computer-Aided Design*). O projeto deve incluir os componentes do equipamento, como pino, disco, sistema de medição de força e dispositivos de movimento e controle.

É fundamental definir as dimensões e especificações dos componentes, considerando as informações obtidas na revisão da norma *ASTM G99*, Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Requisitos de projeto.

| REQUISITOS DO PROJETO  |
|--|
| Flexibilidade de tamanho/dimensão da amostra                   |
| Sistema de Carga peso morto                                    |
| Com célula de carga na base para a medida da carga normal.     |
| Capacidade para converter em ensaios com movimentos circulares |
| A rotação do eixo pode ser ajustada                            |
| Sistema de fixação do corpo de prova.                          |

Fonte: Pesquisa direta (2025).

Os resultados obtidos serão registrados e analisados para avaliar o desempenho do sistema tribológico sob as condições de teste. A análise dos resultados permitirá a compreensão do desgaste e atrito entre os materiais em contato, fornecendo informações importantes para o desenvolvimento de futuros aprimoramentos e otimizações do tribômetro.

### 3.3 Variáveis e Indicadores

Variável é um elemento importante na pesquisa estatística, sendo definida como "tudo aquilo que pode assumir diferentes valores numéricos, como, por exemplo: temperatura, idade, renda familiar e número de filhos de um casal. (GIL, 2022).

Ainda segundo o autor o indicador está diretamente relacionado com a variável, sendo indicado como "uma medida geralmente qualitativa ou quantitativa que reflete ou representa a variável", Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Variáveis e indicadores do trabalho abordado.

| Variável  | Indicadores  |
|---|--|
| Força de contato entre o pino e o disco           | Valor numérico da força de contato medida durante a simulação estática no SolidWorks Simulator.      |
| Coefficiente de atrito entre o pino e o disco     | Valor numérico do coeficiente de atrito obtido durante a simulação estática no SolidWorks Simulator. |
| Velocidade de deslizamento entre o pino e o disco | Valor numérico da velocidade de deslizamento aplicada na simulação estática.                         |
| Material do pino e do disco                       | Tipo e características do material utilizados no modelo de simulação.                                |
| Geometria do pino e do disco                      | Dimensões geométricas do pino e do disco utilizadas na simulação.                                    |

Fonte: Pesquisa direta (2025).

### 3.4 Instrumento de coleta de dados

Os instrumentos de coleta de dados são essenciais para obter informações relevantes para a sua pesquisa, mesmo que não seja construído o dispositivo fisicamente.

No presente trabalho proposto, os instrumentos de coleta de dados serão utilizados para simular e registrar os dados durante a simulação estática no SolidWorks Simulator. Abaixo estão os instrumentos de coleta de dados adequados para o projeto:

**Software SolidWorks Simulator:** O SolidWorks Simulator será o principal instrumento de coleta de dados para realizar a simulação estática do tribômetro pino sobre disco. Ele permitirá aplicação de cargas, restrições e condições de contorno necessárias para obter os resultados de desempenho do dispositivo.

**Célula de carga virtual:** Considerando que o dispositivo não será construído fisicamente, a célula de carga será virtual e simulada dentro do ambiente do SolidWorks Simulator. Essa célula de carga virtual será responsável por medir a força de contato entre o pino e o disco durante a simulação.

**Ferramentas de análise do SolidWorks Simulator:** Além das simulações em si, as ferramentas de análise do SolidWorks Simulator serão usadas para coletar os resultados, como tensões, deformações, deslocamentos, fatores de segurança, entre outros parâmetros relevantes para a análise do desempenho do tribômetro.

**Gráficos e relatórios gerados pelo SolidWorks Simulator:** O próprio software gerará gráficos, relatórios e visualizações dos resultados obtidos nas simulações. Esses gráficos e relatórios fornecerão uma maneira eficaz de apresentar e analisar os dados coletados.

### 3.5 Tabulação dos dados

Considerando que o dispositivo não será construído fisicamente e que os dados serão obtidos por meio de simulações, será importante realizar a tabulação de forma clara e precisa.

Para isso, será criada uma tabela no formato de planilha com colunas representando as variáveis ou parâmetros relevantes para o estudo, incluindo informações como força de contato, tensões máximas, deslocamentos, fatores de segurança e outros dados relevantes obtidos durante as simulações.

As simulações serão identificadas por meio de um número ou código atribuído a cada caso de simulação realizado. Também serão incluídas as unidades de medida adequadas para cada variável na tabela, garantindo a clareza e precisão dos dados apresentados.

Os resultados numéricos obtidos durante as simulações serão inseridos nas células correspondentes da tabela, registrando-se os valores com o número adequado de casas decimais para manter a precisão.

Além da tabela, serão incluídos gráficos ou visualizações dos resultados obtidos no *SolidWorks Simulator*, facilitando a compreensão dos dados e fornecendo uma representação visual dos resultados da simulação.

Uma seção na tabela será dedicada à interpretação dos resultados, onde serão realizados análises e comentários sobre os dados coletados, explicando o significado dos resultados obtidos em relação ao desempenho do tribômetro pino sobre disco.

Caso dados de pesquisa ou informações de fontes externas sejam utilizados para embasar as simulações, as referências adequadas serão incluídas na tabela para dar crédito às fontes utilizadas e manter a integridade acadêmica do trabalho.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Observa-se na Figura 4.1 e Figura 4.2 o projeto desenvolvido em Software SolidWorks compreende um modelo completo de tribômetro pino-sobre-disco, incorporando todos os componentes necessários para simulações tribológicas,

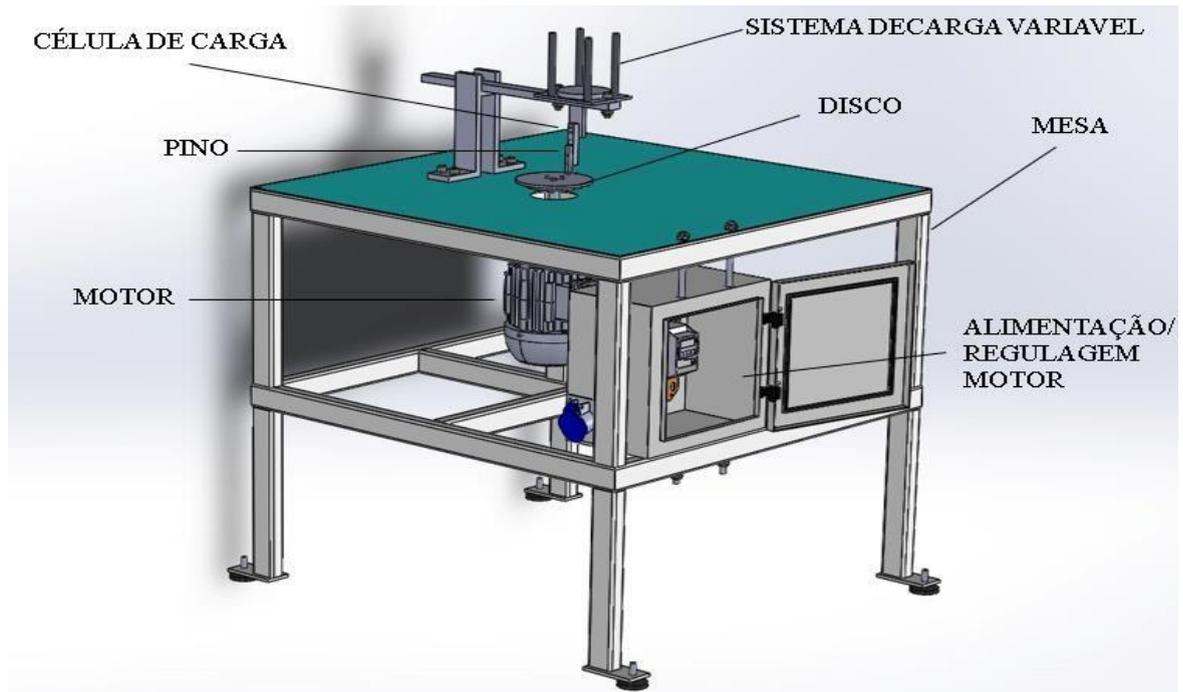


Figura 4.1: Desenho 3D do equipamento projetado.

Fonte: (AUTOR, 2025).

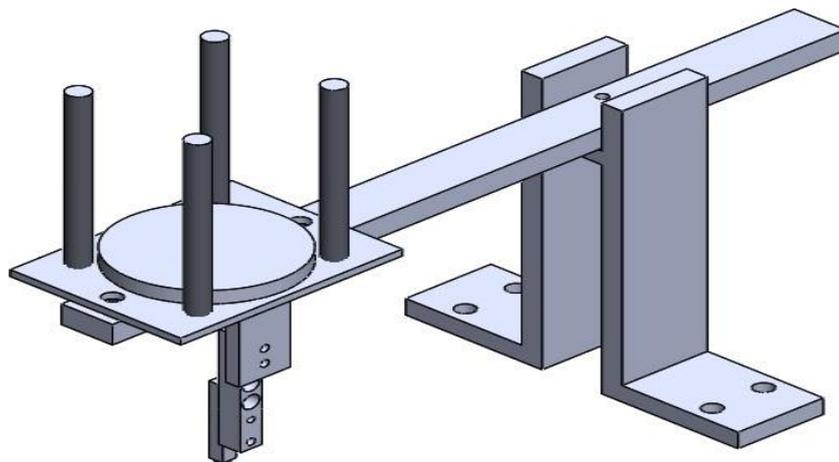


Figura 4.2: Desenho 3D do equipamento projetado.

Fonte: (AUTOR, 2025).

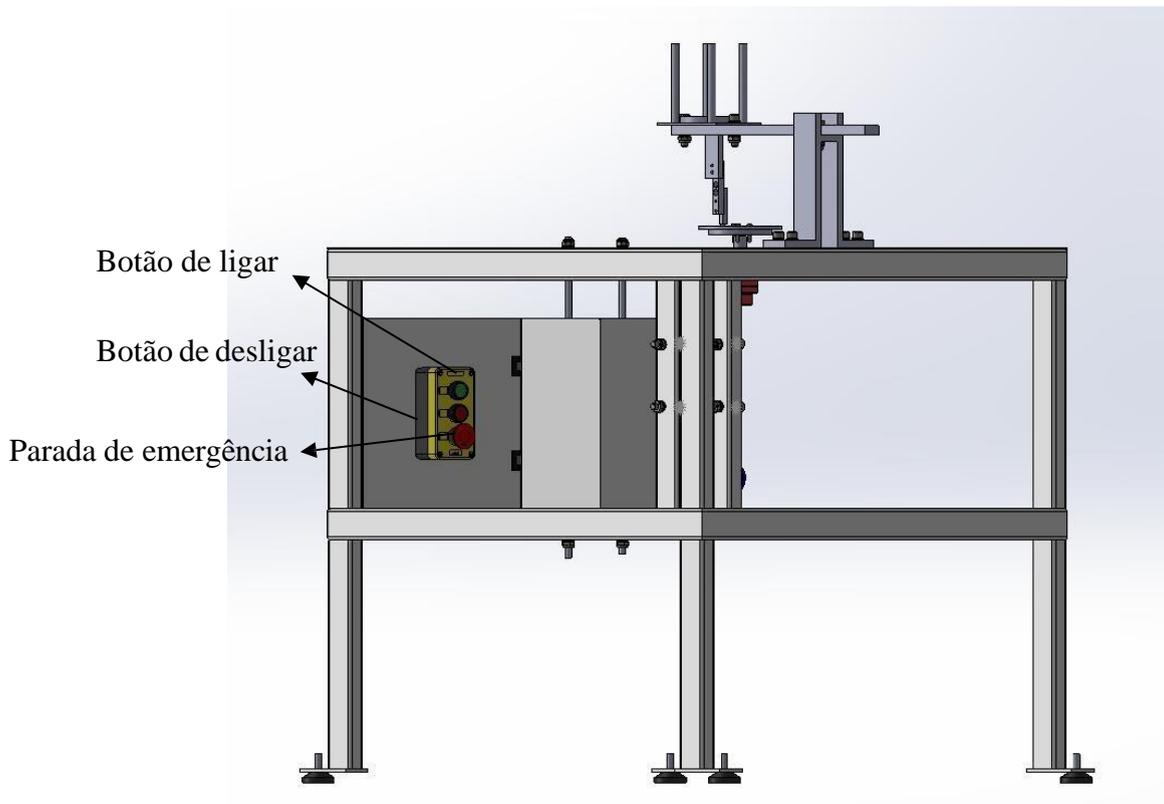


Figura 4.3 Sistema de segurança

Fonte: (AUTOR, 2025).

O conjunto 3D foi projetado com:

- Disco rotativo acionado por motor de velocidade controlável
- Sistema de aplicação de carga ajustável no pino de testes
- Estrutura robusta para garantir precisão nas medições

O modelo permite avaliar parâmetros críticos como força de atrito e taxa de desgaste durante os ensaios simulados. Através das ferramentas do SolidWorks, foi possível:

- Validar dimensionamentos mecânicos
- Verificar interferências entre componentes

Essa abordagem garantiu que o projeto atendesse integralmente aos requisitos da norma ASTM G99, reduzindo custos e tempo de desenvolvimento.

#### 4.1 Especificações

Inicialmente, foram estabelecidas premissas fundamentais para o projeto, visando garantir que o equipamento seja funcional, de baixo custo e capaz de realizar ensaios tribológicos de maneira eficaz. Essas premissas incluem a garantia de mínima vibração ao longo

dos ensaios, assegurando a verticalidade do contato do pino sobre a superfície da amostra e a capacidade de mudança de trilho na amostra. Além disso, o projeto deve ser financeiramente acessível. Para o modelamento, será utilizado o software SolidWorks.

O projeto mecânico do tribômetro pino-disco foi desenvolvido para atender aos requisitos da norma ASTM G99, que estabelece padrões para ensaios de desgaste por deslizamento linear. A seguir, apresentamos o detalhamento técnico dos principais componentes e dimensões normatizadas:

### **Sistema de Aplicação de Carga**

- Dimensão: Carga normal aplicada entre 1-200 N (Seção 6.2 da ASTM G99)
- Componente: Célula de carga certificada classe 0,5 (precisão de  $\pm 0,5\%$ )
- Implementação: Sistema de pesos mortos com alavanca calibrada, permitindo cargas precisas de 5N a 50N

### **Configuração Pino-Disco**

A norma **ASTM G99** não especifica materiais obrigatórios para o pino e disco, mas fornece diretrizes e recomendações.

#### **Diretrizes da Norma**

- **Liberdade de escolha:** A norma permite que os materiais sejam selecionados conforme a aplicação desejada.
- **Recomendações genéricas**
  - **Disco:** Deve ser mais duro que o pino para evitar deformações irreversíveis.
  - **Pino:** Pode ser do mesmo material ou diferente, dependendo do estudo (desgaste, atrito, etc.).

#### **Materiais Típicos Citados**

A norma menciona exemplos comuns, mas não os exige:

- **Discos:**
  - Aço endurecido (ex.: AISI 52100, AISI 1045).
  - Ligas de alumínio (para ensaios leves).

- Cerâmicas (ex.: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiC) para alta resistência ao desgaste.
- **Pinos:**
  - Aço carbono (ex.: AISI 1020, 1045).
  - Materiais não ferrosos (latão, bronze).
  - Polímeros (PTFE, Nylon) para estudos de atrito seco.

### **Requisitos Implícitos**

A norma exige que os materiais atendam a:

- **Acabamento superficial:** Rugosidade controlada ( $Ra \leq 0,2 \mu\text{m}$  para metais).
- **Dureza:** Deve ser reportada no método de ensaio.
- **Homogeneidade:** Sem defeitos ou inclusões que afetem os resultados.

### **Por que a Norma não Padroniza?**

- **Flexibilidade:** Diferentes aplicações exigem pares de materiais distintos (ex.: lubrificados vs. secos).
- **Abordagem científica:** O objetivo é comparar materiais em condições controladas, não restringir combinações.
- Dimensões normalizadas
  - Disco:  $\varnothing$  50-100 mm x espessura  $\geq 5$  mm
  - Pino:  $\varnothing$  2-10 mm x comprimento 10-30 mm

### **Velocidade de Deslizamento**

A norma **ASTM G99** estabelece diretrizes, mas **não define valores fixos** para a velocidade de deslizamento. Em vez disso, ela especifica:

#### **Faixa Recomendada**

A Seção 6.3 da norma menciona que velocidades típicas para ensaios pino-disco variam entre **0,01 m/s e 1 m/s**, porém ressalta que a escolha deve ser baseada:

- No **objetivo do ensaio** (ex.: simular condições reais de operação).
- No **par de materiais** testado (metais, polímeros, lubrificados ou secos).

- Implementação: Sistema motor-inversor com controle de velocidade precisa (0-1000 rpm)

### **Medição de Desgaste**

- Requisitos normativos (Seção 7):
  - Resolução de medição:  $\pm 1 \mu\text{m}$
  - Métodos aceitáveis: Perfilometria ou medição de massa (precisão  $\pm 0,1 \text{ mg}$ )

### **Geometria do Contato**

- Ângulo de contato:  $90^\circ \pm 2^\circ$  (Figura 1 da norma)
- Distância radial ajustável: 10-40 mm do centro do disco

### **Condições Ambientais**

- Controle de temperatura:  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  (Seção 5.3)
- Umidade relativa:  $50 \pm 5\%$  (para ensaios não lubrificados)

### **Sistema de Fixação**

- Torque de aperto:  $5 \pm 0,5 \text{ Nm}$  para fixação do pino (Anexo A3)
- Alinhamento: Tolerância de  $0,02 \text{ mm/m}$

Componentes críticos em conformidade:

- Superfície de deslizamento: Rugosidade controlada ( $R_a \leq 0,2 \mu\text{m}$ )
- Sistema de aquisição: Taxa de amostragem  $\geq 100 \text{ Hz}$

Esses requisitos garantem a precisão e a confiabilidade dos resultados obtidos nos testes de desgaste e atrito realizados com o tribômetro pino-sobre-disco.

### **Explicação dos principais componentes**

O tribômetro pino sobre disco tem como principal objetivo medir o coeficiente de atrito entre dois materiais em contato sob carga controlada. A descrição do funcionamento pode ser dividida em subsistemas específicos:

### **Aquisição de Dados:**

- A força de atrito é medida por uma célula de carga que captura a resistência gerada pelo contato entre o pino e o disco.

- O movimento rotacional do disco é realizado através de um sistema de rotação controlado.

**Pino-Disco:**

- O pino, com ponta esférica de alumina, entra em contato com o disco de teste de aço 1020.
- O disco é rotacionado enquanto a carga é aplicada ao pino, simulando condições de atrito e desgaste.

**Aplicação de Carga:**

- A carga pode ser aplicada de três maneiras: sistema pneumático, hidráulico ou por pesos diretamente ajustados.
- Com a força normal conhecida e a força de atrito lida na célula de carga, é possível calcular o coeficiente de atrito.

**Taxa de Desgaste:**

- O desgaste do disco é medido antes e depois do ensaio, possibilitando o cálculo da taxa de desgaste, essencial para avaliar a resistência do material.

## **4.2 Projeto mecânico**

A concepção estrutural da mesa do tribômetro foi cuidadosamente desenvolvida para atender aos rigorosos requisitos de ensaios tribológicos. A estrutura principal foi projetada utilizando perfis tubulares de Metalon nas dimensões de 50×30 mm com espessura de parede de 2,5 mm, selecionados por sua excepcional relação entre resistência mecânica e peso. Este material assegura a necessária rigidez estrutural enquanto mantém a praticidade de montagem e manuseio do equipamento.

Para a superfície de trabalho, optou-se por uma chapa de aço carbono SAE 1020 com espessura nominal de 6,35 mm (equivalente a 1/4 de polegada), material reconhecido por sua combinação ideal de usinabilidade, resistência mecânica e capacidade de suportar cargas dinâmicas. Esta seleção de materiais garante a durabilidade do conjunto mesmo sob condições operacionais severas.

O processo de junções estruturais foi projetado para ser empregado por meio de soldagem MIG/MAG (Metal Inert Gas/Metal Active Gas), técnica que proporciona excelente penetração de solda com mínima deformação térmica, assegurando a integridade da estrutura. Os pontos críticos de fixação receberam atenção especial no projeto, com furos padronizados M10×1,5

mm executados com tolerância dimensional rigorosa ( $\pm 0,1$  mm) e acabamento superficial controlado ( $R_a \leq 3,2$   $\mu\text{m}$ ) para garantir perfeito alinhamento entre os componentes.

O dimensionamento da mesa considerou diversos aspectos fundamentais para o desempenho do equipamento. A estabilidade estrutural foi calculada para suportar tanto cargas estáticas quanto dinâmicas características dos ensaios tribológicos. A precisão dimensional foi garantida através de especificações rigorosas de alinhamento entre os componentes do tribômetro, enquanto o projeto da distribuição de cargas foi otimizado para evitar concentrações de tensão que poderiam comprometer a integridade do conjunto.

Os apoios do suporte de carga foram projetados para distribuição uniforme de esforços, com superfícies de contato usinadas para perfeito ajuste e sistema de fixação padronizado em roscas M10. A resistência mecânica foi calculada com margem de segurança de 50% acima da carga máxima prevista em operação.

A integração harmoniosa da mesa com os demais sistemas do tribômetro - incluindo mecanismo de aplicação de carga, movimento linear, dispositivos de medição e componentes eletrônicos de controle - foi cuidadosamente considerada no projeto. O resultado final é uma estrutura que combina robustez, precisão dimensional, segurança operacional em conformidade com a NR-12, e facilidade de manutenção, garantindo desempenho confiável ao longo da vida útil do equipamento mesmo sob condições de uso intensivo.

Na Figura 3.4 observa-se a mesa projetada em 3D para fabricação, utilizando o software SolidWorks para concepção do projeto.

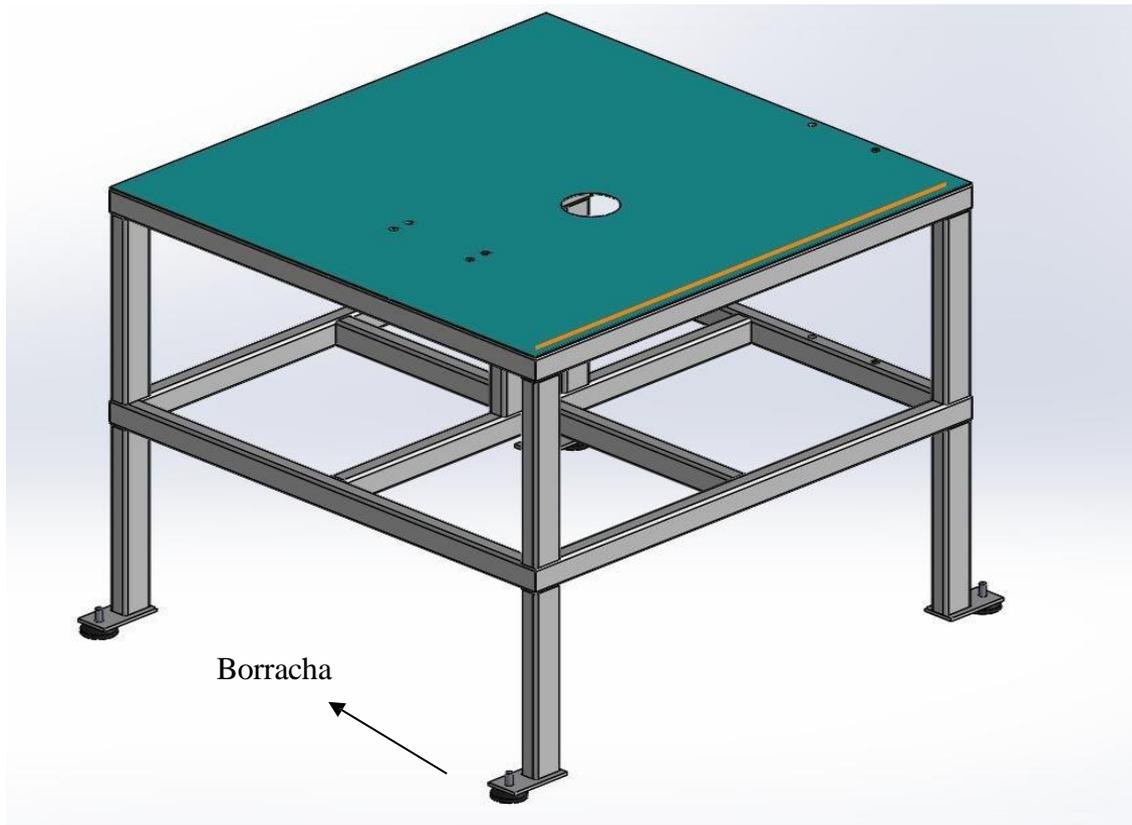


Figura 4.4: Mesa de apoio dos componentes do tribômetro.

Fonte: (AUTOR, 2025).

A Figura 4.4 ilustra mesa do tribômetro que foi projetada para garantir **estabilidade, resistência e precisão** durante os ensaios de atrito e desgaste. Sua estrutura é composta por:

- **Perfis de Metalon 50x30mm (2,5mm de espessura)** – proporcionando rigidez e durabilidade.
- **Chapa de aço carbono SAE 1020 (6,35mm)** – usinada para garantir uma superfície plana e resistente.
- **Solda MIG/MAG** – assegurando junções robustas e livres de deformações.
- **Furos com rosca M10x1,5mm** – permitindo montagem precisa de componentes.

#### **Borracha na Região do Pé da Mesa**

Para amortecimento de vibrações e proteção contra deslizamento, os pés da mesa são revestidos com borracha antiderrapante. Essa borracha:

- Reduz a transmissão de vibrações do motor e do sistema rotativo, melhorando a precisão das medições.

- Evita movimentos indesejados durante operação, garantindo segurança e estabilidade.
- Protege superfícies onde o tribômetro é instalado, evitando danos ao piso.

#### 4.2.1 Motorização

Para o dimensionamento de um motor elétrico que atenderia a demanda de esforços e velocidade para a realização dos ensaios foram considerados os seguintes dados iniciais de projeto:

Provetes:

Discos:

- $\varnothing$  Min = 50 – 60 mm
- $\varnothing$  Max = 100-120mm
- Peso Max = 2kg

Pinos

- $\varnothing$  = 4 – 10 mm
- Altura = 10 – 30 mm

Velocidade linear máxima: 3 m/s (500 rpm, d=120mm)

Carregamento: 0 – 10 Kg

Material do pino e material do disco definido pelo usuário.

A força normal ( $F_{normal}$ ) é a força resultante da ação da gravidade sobre a carga e o disco. Ela é calculada pela fórmula:

$$F_{normal} = (m_{carga} + m_{disco}) * g$$

Onde:

- $m_{carga}$  = 10kg (máximo carregamento),
- $m_{disco}$  = 2kg (massa do disco),
- $g$  = 9,81m/s<sup>2</sup> (aceleração da gravidade).

Com isso, se faz necessário o dimensionamento do motor elétrico seguindo os seguintes passos:

$$F_{normal} = (m_{carga} + m_{disco}) * 9,81m/s^2 = (10kg + 2kg) * 9,81m/s^2 = 117,72 N$$

A força de atrito é calculada multiplicando a força normal pelo coeficiente de atrito

- $\mu=0,6$  (coeficiente de atrito).

O coeficiente de atrito ( $\mu$ ) de 0,6 mencionado no dimensionamento é um valor típico para pares de materiais metálicos

$$f_{at} = F_{normal} * Conf. atrito = 117,72 N * 0,6 = 70,63N$$

O cálculo da  $F_{TOTAL}$  no dimensionamento do motor do tribômetro considera duas componentes principais:

**Força Normal** → Resultante do peso aplicado sobre o sistema:

- Massa do carregamento (ex.: 10 kg)
- Massa do disco (ex.: 2 kg)
- Aceleração da gravidade (9,81 m/s<sup>2</sup>)
- **Unidade:** Newtons (N)

**Força de Atrito** → Resistência ao movimento entre o pino e o disco:

- $\mu$  (coeficiente de atrito): Adotado como 0,6 (valor típico para metais ou condições severas).
- **Unidade:** Newtons (N)

A  $F_{TOTAL}$  representa a **força tangencial total** que o motor deve vencer para:

**Superar o atrito** ( $F_{at}$ ) entre o pino e o disco.

**Manter o contato** ( $F_{normal}$ ) que gera a força normal necessária para o ensaio tribológico.

A força total é a soma da força normal e da força de atrito:

$$F_{TOTAL} = F_{normal} + f_{at} = 117,72 N + 70,63N = 188,35N$$

O raio é metade do diâmetro máximo do disco:

Onde:

- Diâmetro máximo = 120 mm = 0,12 m.

$$r = \emptyset Max / 2 = 120 mm / 2 = 60mm = 0,06m$$

O torque é calculado multiplicando a força total pelo raio:

$$Torque = FTOTAL * r = 188,35N * 0,06m = 11,301 Nm$$

É importante também considerar que no momento de partida do motor ele tenha que romper um torque inercial para operar na velocidade estipulada.

$$I = 1/2 * (mdisco * r^2) = 1/2 * (2kg * 0,06m^2) = 0,0036 kg/m^2$$

A velocidade angular ( $w$ ) é calculada a partir da rotação (RPM):

Onde:

- RPM = 500.

$$w = RPM * (2 * \pi / 60) = 500 rpm * (2 * \pi / 60) = 52,36 Rad/s$$

A aceleração angular ( $a$ ) é a variação da velocidade angular no tempo:

Onde:

- $t = 2s$  (tempo de partida).

$$a = w/t = 52,36 Rad/s / 2s = 26,18 Rad/s^2$$

O torque inercial é calculado multiplicando o momento de inércia pela aceleração angular:

$$Tinercial = I * a = 0,0036 kg.m^2 * 26,18 Rad/s^2 = 0,09425 Nm$$

O torque total é a soma do torque e do torque inercial:

$$Ttotal = Torque + Tinercial = 11,301 Nm + 0,09425 Nm = 11,4Nm$$

A potência em cavalos-vapor (CV) é calculada pela fórmula:

$$Potencia(CV) = Ttotal * RPM / 7024 = (11,4 Nm * 500 rpm) / 7024 = 0,81 CV$$

Considerando a escolha do fator de segurança varia de acordo com a aplicação. Considerando aplicações **suaves e controladas**: FS entre **1,2 e 1,5**.

$$potencia final = CV * FS = 0,81 CV * 1,5 = 1,22 CV$$

A diferença entre um motor monofásico de 2 pólos e um de 4 pólos está principalmente na sua velocidade síncrona e nas suas aplicações típicas. 4 **Pólos** é ideal para aplicações que exigem baixa velocidade e torque mais alto, esses motores operam a uma velocidade síncrona mais baixa, resultando em uma rotação mais lenta com maior torque. São úteis em aplicações que requerem mais força de rotação a uma velocidade reduzida.

Considerando ideal para o projeto um motor monofásico de 4 pólos, podemos determinar a velocidade síncrona do mesmo:

$$NS = 120 * \text{HZ} / N^{\circ} \text{ polos} = 120 * 60\text{Hz} / 4 = 1800 \text{ rpm}$$

No Brasil o padrão de frequência para equipamentos elétricos e para o fornecimento de energia é **60 Hz**.

Observa-se na Figura 4.5 o motor escolhido de acordo com o dimensionamento do tribômetro:

| Características                                |
|--|
| • Carcaça: L90S                                |
| • Potência: 1,5 HP                             |
| • Frequência: 60 Hz                            |
| • Polos: 4                                     |
| • Rotação nominal: 1760                        |
| • Escorregamento: 2,22 %                       |
| • Tensão nominal: 220/380 V                    |
| • Corrente nominal: 4,52/2,62 A                |
| • Corrente de partida: 39,8/23,0 A             |
| • Ip / In: 8,8                                 |
| • Corrente a vazio: 2,79/1,62 A                |
| • Conjugado nominal: 5,97 Nm                   |
| • Conjugado de partida: 310 %                  |
| • Conjugado máximo: 380 %                      |
| • Categoria: ---                               |
| • Classe de isolamento: F                      |
| • Elevação de Temperatura: 80 K                |
| • Tempo de Rotor Bloqueado: 16 s (quente)      |
| • Fator de serviço: 1,25                       |
| • Regime de serviço: S1                        |
| • Temperatura Ambiente: -20°C – +40°C          |
| • Altitude: 1000 m                             |
| • Proteção: IP55                               |
| • Massa aproximada: 25 kg                      |
| • Momento de inércia: 0,00600 kgm <sup>2</sup> |
| • Nível de ruído: 51 dB(A)                     |

Figura 4.5: Descrição de motor dimensionado.

Fonte: WEG (2024).

## **Cálculos de verificação e dimensionamento sistema de alimentação e regulagem do motor**

Este documento apresenta os cálculos e as especificações técnicas para a ligação elétrica do motor WEG W22 de 1,5 CV controlado pelo inversor de frequência WEG CFW100. O objetivo é fornecer uma análise detalhada das decisões de projeto, parâmetros utilizados e resultados obtidos.

### Especificações do Motor

- **Modelo:** WEG W22
- **Potência:** 1,5 CV (aproximadamente 1119 W)
- **Tensão:** 220 V (monofásica)

- **Frequência:** 60 Hz
- **Eficiência:** 90% (considerada para cálculos)
- Especificações do Inversor
- **Modelo:** WEG CFW100
- **Corrente de Saída:** 1,6 a 7,3 A
- **Potência Nominal:** 0,18-1,5 kW (0,25 – 2 CV)
- **Alimentação:** Monofásica 100-127V / 200-240V
- **Controle:** Vetorial (VVW) ou Escalar (V/F)

### **Cálculo da Corrente do Motor**

A corrente do motor pode ser calculada utilizando a fórmula:

$$I = \frac{P}{V \cdot \eta}$$

onde:

- P = Potência em watts (W)
- V = Tensão em volts (V)
- $\eta$  = Eficiência (como fração)

Para um motor de 1,5 CV:

$$P = 1,5 \times 746 \approx 1119 \text{ WP}$$

$$P = 1,5 \times 746 \approx 1119 \text{ W}$$

Substituindo os valores:

$$I = \frac{1119}{220 \cdot 0,90} \approx 5,66 \text{ A}$$

### **Dimensionamento do Circuito de Proteção do Motor**

O circuito de proteção do motor tem como objetivo garantir a segurança e a durabilidade do motor e dos componentes do sistema elétrico. Ele protege o motor contra situações que podem causar danos, como:

Principais funções do circuito de proteção:

- Proteção contra sobrecarga:

- Evita que o motor opere acima da corrente nominal por um período prolongado, o que poderia causar superaquecimento e danos ao enrolamento do motor.
- O relé de sobrecarga é responsável por monitorar a corrente e desligar o motor se a corrente exceder um valor pré-ajustado.
- Proteção contra curtos-circuitos:
  - Um curto-circuito pode causar danos graves ao motor e à instalação elétrica.
  - O disjuntor termomagnético atua rapidamente para interromper a corrente em caso de curto-circuito.
- Proteção contra falhas de fase (em motores trifásicos):
  - Em motores trifásicos, a falta de uma fase pode causar desequilíbrios e superaquecimento.
  - Relés de proteção específicos podem detectar e interromper o funcionamento do motor nesses casos.
- Proteção contra sobretensão ou subtensão:
  - Tensões fora da faixa nominal podem danificar o motor ou reduzir sua eficiência.
  - O inversor de frequência ou dispositivos de proteção podem monitorar a tensão e desligar o motor se necessário.
- Proteção térmica:
  - Sensores térmicos no motor ou no circuito podem detectar superaquecimento e interromper o funcionamento.

De acordo com a corrente nominal de 5,66A foi escolhido um disjuntor com corrente nominal de 10 A (para garantir margem de segurança), dependendo de curva (B ou C) e da aplicação específica.

O relé de sobrecarga deve ser ajustado entre 0,9 e 1,1 vezes a corrente nominal do motor:

$$I = 5,66 \text{ A} \times 1,1 \approx 6,22 \text{ A}$$

Portanto, um relé de sobrecarga com ajuste entre foi ajustado em 7A.

### **Dimensionamento dos cabos**

Observa-se na Figura 4.6 abaixo SIL FIOS e Cabos o padrão fornecido para dimensionamento dos fios.:

## Capacidade de condução de corrente em amperes (A) para cabos de cobre com isolamento em PVC (70° C)

• Método de instalação: B1, B2 e C.

| Seção Nominal do Condutor (mm <sup>2</sup> ) | Métodos de referência indicados |                         |                         |                         |                         |                         |
|--|---------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
|  | B1                              |                         | B2                      |                         | C                       |                         |
|  | 2 Condutores Carregados         | 3 Condutores Carregados | 2 Condutores Carregados | 3 Condutores Carregados | 2 Condutores Carregados | 3 Condutores Carregados |
| 0,5  | 9                               | 8                       | 9                       | 8                       | 10                      | 9                       |
| 0,75   | 11                              | 10                      | 11                      | 10                      | 13                      | 11                      |
| 1  | 14                              | 12                      | 13                      | 12                      | 15                      | 14                      |
| 1,5  | 17,5                            | 15,5                    | 16,5                    | 15                      | 19,5                    | 17,5                    |
| 2,5  | 24                              | 21                      | 23                      | 20                      | 27                      | 24                      |
| 4  | 32                              | 28                      | 30                      | 27                      | 36                      | 32                      |
| 6  | 41                              | 36                      | 38                      | 34                      | 46                      | 41                      |
| 10   | 57                              | 50                      | 52                      | 46                      | 63                      | 57                      |
| 16   | 76                              | 68                      | 69                      | 62                      | 85                      | 76                      |
| 25   | 101                             | 89                      | 90                      | 80                      | 112                     | 96                      |
| 35   | 125                             | 110                     | 111                     | 99                      | 138                     | 119                     |
| 50   | 151                             | 134                     | 133                     | 118                     | 160                     | 144                     |
| 70   | 192                             | 171                     | 168                     | 149                     | 213                     | 184                     |
| 95   | 232                             | 207                     | 201                     | 179                     | 258                     | 223                     |
| 120  | 269                             | 239                     | 232                     | 206                     | 299                     | 259                     |
| 150  | 309                             | 275                     | 265                     | 236                     | 344                     | 299                     |
| 185  | 353                             | 314                     | 300                     | 268                     | 392                     | 341                     |
| 240  | 415                             | 370                     | 351                     | 313                     | 461                     | 403                     |
| 300  | 477                             | 426                     | 401                     | 358                     | 530                     | 464                     |
| 400  | 571                             | 510                     | 477                     | 425                     | 634                     | 557                     |
| 500  | 656                             | 587                     | 545                     | 486                     | 729                     | 642                     |

Extraída da norma NBR 5410:2004 - Instalações Elétricas de Baixa Tensão.

Figura 4.6: Tabela de corrente de cabos elétricos.

Fonte: WEG (2024).

Os cabos escolhidos foram de 2,5 mm<sup>2</sup>, que suportam até 24 A, devido à necessidade de garantir uma margem de segurança adequada em relação à corrente nominal do motor de 1,5 CV, que é de aproximadamente 5,66 A. Essa escolha permite acomodar variações na corrente durante a operação, como em situações de partida ou sobrecarga temporária, além de assegurar uma menor queda de tensão ao longo da extensão do cabo. Considerando também o ambiente em que a instalação será realizada, onde a temperatura e a ventilação podem afetar a capacidade de condução dos cabos, optou-se por um tamanho que atende às exigências da norma técnica e proporciona uma operação segura e eficiente do sistema.

### Análise do Inversor

A escolha do inversor (WEG CFW100) foi baseada em critérios técnicos para garantir que ele atenda às necessidades do motor e da aplicação. Os principais fatores considerados foram:

Critérios de escolha do inversor:

- Potência do motor:
  - O motor WEG W22 tem uma potência de 1,5 CV (aproximadamente 1119 W).
  - O inversor WEG CFW100 suporta potências de 0,18 a 1,5 kW (0,25 a 2 CV), o que cobre a potência do motor.

- Corrente nominal do motor:
  - A corrente nominal do motor é 5,66 A.
  - O inversor CFW100 suporta correntes de saída entre 1,6 A e 7,3 A, o que é compatível com a corrente do motor.
- Tensão de alimentação:
  - O motor opera em 220 V monofásico.
  - O inversor CFW100 é compatível com alimentação monofásica de 200-240 V, atendendo à tensão do motor.
- Controle de velocidade:
  - O inversor permite controle de velocidade por meio de um potenciômetro, o que é essencial para a aplicação.
  - Ele oferece modos de controle vetorial (VVW) e escalar (V/F), proporcionando flexibilidade de operação.
- Proteções integradas:
  - O inversor possui proteções internas contra sobrecarga, curto-circuito, sobretensão e subtensão, aumentando a segurança do sistema.
- Compatibilidade com o motor:
  - O inversor WEG CFW100 é da mesma marca do motor (WEG), o que garante compatibilidade técnica e facilidade de integração.

O inversor WEG CFW100, com uma corrente de saída máxima de 7,3 A, é adequado para a aplicação, uma vez que a corrente calculada do motor está dentro da faixa de operação do inversor.

### **Projeto elétrico**

O diagrama elétrico é uma representação gráfica que mostra como os componentes do sistema elétrico estão interconectados. Ele serve como um guia para a instalação, manutenção e entendimento do funcionamento do sistema. No caso do projeto do motor WEG W22 controlado pelo inversor WEG CFW100, o diagrama elétrico ilustra as conexões entre o motor, o inversor, os dispositivos de proteção e os elementos de controle.

## Componentes do Diagrama Elétrico

- **Alimentação Elétrica:**
  - Representa a fonte de energia (220 V monofásica) que alimenta o sistema.
  - Conectada ao disjuntor termomagnético.
- **Disjuntor Termomagnético:**
  - Protege o circuito contra curtos-circuitos e sobrecargas.
  - Conectado à entrada do inversor de frequência.
- **Inversor de Frequência (WEG CFW100):**
  - Controla a velocidade do motor e protege o sistema contra falhas elétricas.
  - Recebe energia do disjuntor e envia energia controlada para o motor.
- **Motor Elétrico (WEG W22):**
  - Conectado à saída do inversor.
  - Recebe energia variável para operar em diferentes velocidades.
- **Potenciômetro:**
  - Conectado ao inversor para ajustar a velocidade do motor.
  - Atua como um controle manual de velocidade.
- **Botão Liga/Desliga:**
  - Conectado ao inversor para iniciar ou parar o motor.
  - Pode ser um botão simples ou um sistema mais complexo com contatores.
- **Botão de Emergência:**
  - Conectado ao circuito de controle do inversor.
  - Interrompe imediatamente a alimentação do motor em caso de emergência.
- **Relé de Sobrecarga:**
  - Conectado ao circuito do motor para protegê-lo contra operação acima da corrente nominal.
  - Pode ser integrado ao inversor ou instalado externamente.
- **Fiação:**
  - Cabos de 2,5 mm<sup>2</sup> conectam todos os componentes.
  - Garantem a transmissão segura e eficiente da energia.

## **Funcionamento do Diagrama Elétrico**

- **Alimentação:**

A energia elétrica (220 V monofásica) é fornecida ao sistema através do disjuntor termomagnético.

- **Proteção:**

O disjuntor protege o circuito contra curtos-circuitos e sobrecargas.

O relé de sobrecarga monitora a corrente do motor e desliga o sistema em caso de sobrecarga.

- **Controle de Velocidade:**

O inversor recebe energia do disjuntor e ajusta a tensão e frequência enviadas ao motor.

O potenciômetro permite ajustar a velocidade do motor manualmente.

- **Ligar/Desligar:**

O botão Liga/Desliga controla o funcionamento do motor através do inversor.

O botão de emergência interrompe imediatamente a operação em caso de perigo.

- **Operação do Motor:**

O motor recebe energia controlada do inversor e opera na velocidade desejada.

A inversor monitora e protege o motor contra falhas elétricas.

**Critério de Tensão Admissível:** O sistema foi projetado para operar a uma tensão de 220 V, considerando a variação de  $\pm 10\%$  permitida.

Observa-se na Figura 4.7 o diagrama de comandos elétricos das ligações essenciais entre os componentes principais. Inclui a alimentação do inversor, as conexões do motor trifásico WEG W22, a ligação do potenciômetro para controle de velocidade e o circuito do botão de emergência.

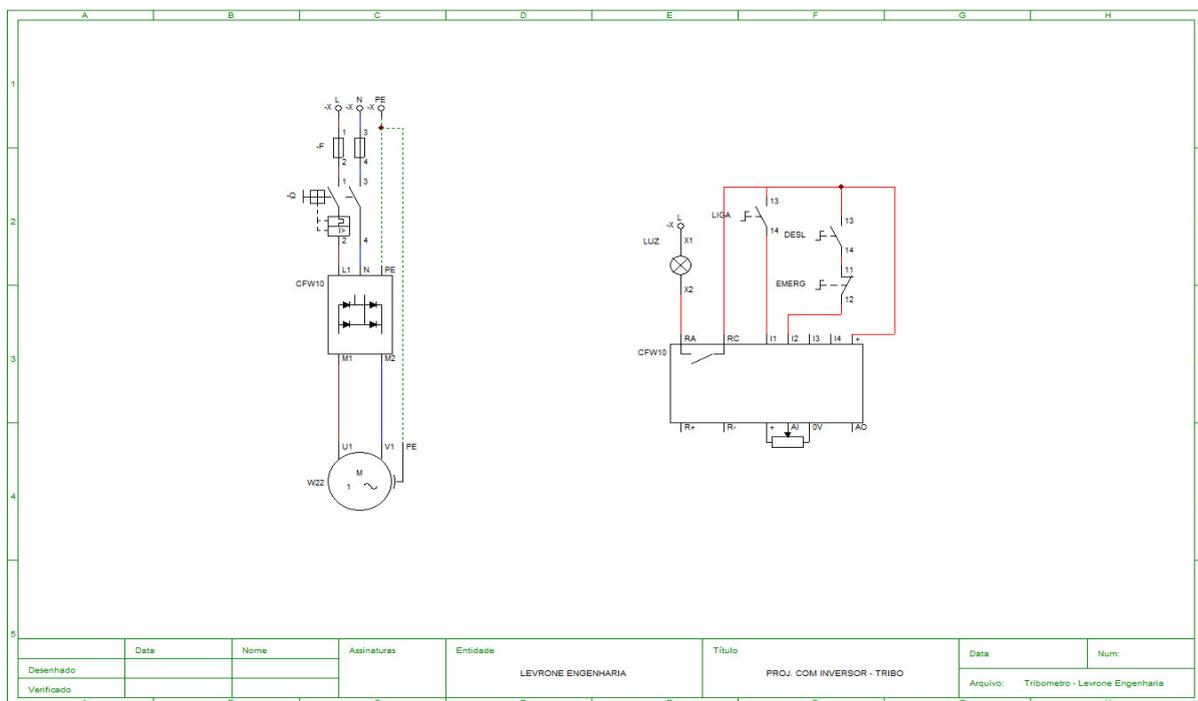


Figura 4.7: Projeto elétrico tribômetro com acionamento via inversor de frequência.

Fonte: (AUTOR, 2025).

Os componentes utilizados foram:

- **Motor WEG W22:** 1,5 CV, 220 V, 5,66 A.
- **Inversor de Frequência WEG CFW100:** 1,6 a 7,3 A, controle vetorial ou escalar.
- **Potenciômetro 10 kΩ:** Controle de velocidade do motor.
- **Botão Liga/Desliga:** Início e parada do motor.
- **Botão de Emergência:** Interrupção imediata da alimentação do motor.
- **Fiação de 2,5 mm<sup>2</sup>:** Cabos para transmissão de energia.
- **Disjuntor Termomagnético 10 A:** Proteção contra sobrecargas e curtos-circuitos.
- **Relé de Sobrecarga:** Ajustável entre 6 A e 7 A para proteção do motor.

O controle de velocidade é feito através de um potenciômetro conectado ao inversor, enquanto o motor é ligado e desligado por um botão. Em casos de emergência, um botão de emergência é utilizado para interromper imediatamente o funcionamento do motor

Os cálculos realizados confirmam que o motor WEG W22 de 1,5 CV é compatível com o inversor WEG CFW100, garantindo a segurança e a eficiência do sistema.

## **Procedimentos e Estratégias de Montagem**

Para o desenvolvimento deste trabalho, é essencial realizar uma análise abrangente do projeto para assegurar a viabilidade dos conjuntos e subconjuntos propostos.

### **Mesa**

A mesa foi projetada utilizando tubos de metalon com dimensões de 50x30 mm e espessura de 2,5 mm. O metalon é um perfil tubular de alta resistência, que oferece uma base sólida para a mesa. A chapa especificada é de aço carbono 1020, com espessura de 1/4 de polegada (aproximadamente 6,35 mm). Este tipo de aço é conhecido por sua boa usinabilidade e resistência, tornando-o ideal para superfícies que suportam peso e uso intenso. As junções entre o tubo de metalon e a chapa de aço carbono foram planejadas para serem soldadas utilizando o processo MIG/MAG (Metal Inert Gas/Metal Active Gas).

### **Apoio dos Suportes do Peso**

Os apoios foram projetados para serem usinados com precisão, garantindo que os furos possuam as dimensões exatas e uma qualidade de superfície adequada. Foram especificados furos com rosca M10 x 1,5 mm, que são padrões industriais reconhecidos por sua eficiência em aplicações que requerem montagem segura e confiável.

### **Eixo**

O eixo foi projetado em aço SAE 1020, utilizando processos de usinagem para alcançar a geometria requerida. Foi especificado um rosqueamento M12, que é um padrão amplamente utilizado em aplicações industriais.

### **Acoplamento**

Os acoplamentos selecionados são comerciais, fabricados em material AG112, um tipo de aço de alta resistência.

### **Pino**

O pino foi projetado em alumina (óxido de alumínio  $Al_2O_3$ ) devido à sua elevada dureza. Para atingir a geometria requerida, o material será submetido a processos de usinagem.

### **Disco de Teste**

Os discos de teste foram projetados para serem fabricados em três tipos de materiais diferentes: aço SAE 1020, borracha comum e PTFE (Teflon). Esses materiais, por possuírem

propriedades distintas, permitirão uma melhor calibração do equipamento, proporcionando uma diversidade de resultados para análise comparativa.

### **Célula de Carga**

Foi especificada a utilização de uma célula de carga comercial adequada às necessidades do projeto.

### **Braço Principal, Pesos, Base dos Discos, Suporte Principal, Disco de Fixação**

Esses componentes foram projetados em aço SAE 1020 e serão usinados posteriormente para obter as geometrias requeridas.

### **Parafusos**

Serão utilizados parafusos comerciais, fabricados em aço SAE 1020, conforme as especificações do projeto.

Observa-se no **Apêndice A** o desenho técnico final do tribômetro e seus respectivos componentes detalhados.

## **4.3 Descrição Geral da Operação, Manutenção e Montagem do Produto**

1. **Preparação:** Antes de cada uso, verificar a integridade do equipamento e das proteções de segurança.
2. **Montagem do Pino e Disco:** O operador deve fixar o pino de teste no suporte e garantir que o disco esteja devidamente posicionado e ajustado.
3. **Ajuste de Carga:** A carga de teste será ajustada através de um sistema de controle, permitindo a aplicação precisa da força sobre o pino.
4. **Configuração dos Sensores:** Os sensores de medição de atrito e desgaste devem ser calibrados conforme o tipo de material e as condições de teste.
5. **Início da Operação:** Após as verificações e configurações, o motor será acionado para iniciar a rotação do disco.
6. **Monitoramento em Tempo Real:** Durante o teste, o operador deve monitorar os sensores que fornecem informações sobre o coeficiente de atrito e o desgaste das superfícies em contato.

7. **Parada de Emergência:** Em caso de emergência, o operador pode acionar o botão de parada de emergência, interrompendo imediatamente a operação.

Este procedimento foi elaborado para garantir a segurança e a eficácia na operação do equipamento, assegurando resultados precisos e confiáveis durante os testes

#### 4.4 Análise Financeira dos componentes necessários para construção

Para a construção completa de um tribômetro do tipo pino-disco, seria necessário desenvolver alguns componentes específicos e adquirir outros itens comercialmente disponíveis. Esta abordagem combinada permite otimizar custos e garantir a qualidade do equipamento, atendendo aos requisitos técnicos dos ensaios de atrito e desgaste.

##### **Componentes a Serem Fabricados:**

A estrutura principal do tribômetro demandaria a construção de várias peças essenciais:

1. **Estrutura da Mesa:** Utilizando tubos de metalon 50x30mm com espessura de 2,5mm e chapas de aço carbono SAE 1020 de 6,35mm. A montagem seria realizada através de soldagem MIG/MAG, garantindo robustez e precisão dimensional. Esta estrutura precisaria incluir bases de nivelamento ajustáveis para compensar irregularidades na superfície de instalação.
2. **Suporte do Pino:** Um mecanismo estacionário projetado para fixar firmemente o pino de ensaio, permitindo aplicação precisa e controlada da carga normal. Este componente deveria incorporar um sistema de alinhamento micrométrico para garantir perpendicularidade exata em relação ao disco.
3. **Eixo de Rotação:** Fabricado em aço SAE 1020 ou 1045, usinado com tolerâncias estreitas ( $\pm 0,01\text{mm}$ ) para garantir concentricidade. O eixo incluiria um sistema de fixação para o disco de ensaio, possivelmente com flange rosqueada ou sistema de encaixe cônico.
4. **Sistema de Aplicação de Carga:** Desenvolvido como um sistema mecânico com pesos calibrados. O projeto deveria incorporar guias lineares para garantir aplicação puramente vertical da força.
5. **Carcaça de Proteção:** Estrutura em chapa metálica ou policarbonato resistente, projetada para envolver as partes móveis, com aberturas estratégicas para acesso aos componentes de medição e ajuste.

#### 4.5 Componentes a Serem Adquiridos Comercialmente:

Para garantir precisão e confiabilidade, diversos componentes deveriam ser selecionados entre os disponíveis no mercado:

1. **Sistema de Acionamento:** Motor elétrico trifásico WEG W22 (0,5-1,5CV) acoplado a um inversor de frequência WEG CFW100 para controle preciso da velocidade de rotação (0-1000 RPM). Este conjunto permitiria variação contínua e estável da velocidade do disco.
2. **Sistema de Medição:** Célula de carga de alta precisão (capacidade 20-50kgf, resolução 0,01N) para medição da força normal, acoplada a um módulo de condicionamento de sinal com saída para aquisição de dados. Sensores complementares como encoder rotativo para medição precisa da velocidade angular.
3. **Controles e Segurança:** Painel de controle com potenciômetro para ajuste de velocidade, botões de emergência com trava mecânica, e sensores de segurança conforme NR-12 (cortinas de luz ou sensores de presença).
4. **Sistema de Aquisição de Dados:** Placa de aquisição dedicada ou sistema compacto com software especializado para registro contínuo de força de atrito, deslocamento vertical (desgaste) e outros parâmetros relevantes.
5. **Componentes Mecânicos Padronizados:** Guias lineares, elementos de fixação (parafusos M10 grau 12.9), acoplamentos flexíveis e outros componentes mecânicos de qualidade industrial.
6. **Ferramentas de Análise:** Software especializado para análise tribológica, compatível com normas como ASTM G99, capaz de calcular coeficiente de atrito, taxa de desgaste e gerar relatórios completos dos ensaios.

#### 4.6 Considerações sobre Materiais:

Os materiais selecionados para os componentes fabricados deveriam considerar:

- Resistência ao desgaste para partes sujeitas a atrito
- Estabilidade dimensional sob variações térmicas
- Facilidade de usinagem para componentes complexos
- Compatibilidade com os fluidos ou ambientes de ensaio

#### 4.7 Processo de Integração:

A montagem final exigiria:

- Alinhamento preciso entre eixo, suporte do pino e sistema de carga
- Balanceamento dinâmico do conjunto rotativo
- Calibração dos sistemas de medição
- Testes de funcionamento sob diversas condições

#### 4.8 Custos Envolvidos no Projeto Real

A análise de custos é uma etapa fundamental para a viabilização de qualquer projeto mecânico. Neste tópico, serão detalhados os custos associados aos principais componentes do tribômetro, considerando materiais, processos de fabricação e valores de mercado. A estrutura será dividida em subtópicos para facilitar a compreensão e organização das informações.

##### **Mesa**

A mesa do tribômetro foi projetada para ser fabricada utilizando tubos de metalon com dimensões de 50x30 mm e espessura de 2,5 mm, combinados com uma chapa de aço carbono 1020 de 6,35 mm de espessura. O metalon é um perfil tubular de alta resistência, enquanto o aço carbono 1020 é conhecido por sua usinabilidade e resistência mecânica.

##### **Custos:**

- **Tubo de metalon 50x30 mm (2,5 mm de espessura):** R\$ 50,00 por metro linear (preço médio de mercado em 2023).
- **Chapa de aço carbono 1020 (6,35 mm de espessura):** R\$ 800,00 por chapa de 2x1 metros (preço médio de mercado em 2023).
- **Soldagem MIG/MAG:** R\$ 50,00 por hora de trabalho (considerando mão de obra especializada).
- **Referências:**

Preços de tubos de metalon e chapas de aço carbono foram obtidos através de cotações em empresas como **Gerdau** e **Tupy**.

##### **Apoio dos Suportes do Peso**

Os apoios foram usinados para garantir precisão dimensional e qualidade superficial. Foram utilizados furos com rosca M10 x 1,5 mm, padrão industrial para montagens seguras.

### **Custos:**

- **Usinagem dos apoios:** R\$ 30,00 por peça (considerando usinagem CNC).
- **Referências:**

Preços de usinagem foram obtidos através de cotações em oficinas mecânicas locais.

### **Eixo**

O eixo foi fabricado em aço SAE 1020, com rosqueamento M12, padrão industrial para aplicações que exigem resistência e durabilidade.

### **Custos:**

- **Barra de aço SAE 1020 (diâmetro 25 mm):** R\$ 100,00 por metro linear (preço médio de mercado em 2023).
- **Usinagem do eixo:** R\$ 50,00 por peça (considerando usinagem CNC).
- **Referências:**

Preços de barras de aço SAE 1020 foram obtidos através de cotações em empresas como **Villares Metals**.

### **Acoplamento**

Os acoplamentos utilizados são comerciais, fabricados em aço de alta resistência (material AG112), garantindo durabilidade e eficiência na transmissão de torque.

### **Custos:**

- **Acoplamento AG112:** R\$ 150,00 por unidade (preço médio de mercado em 2023).

### **Referências:**

Preços de acoplamentos foram obtidos através de cotações em empresas como **SKF** e **Tecnoacoplamentos**.

### **Pino**

O pino fabricado em Alumina (óxido de alumínio - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), material conhecido por sua elevada dureza e resistência ao desgaste.

### **Custos:**

- **Barra de Alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>):** R\$ 200,00 por peça (preço médio de mercado em 2023).
- **Usinagem do pino:** R\$ 40,00 por peça (considerando usinagem CNC).

- **Referências:**

Preços de barras de Alumina foram obtidos através de cotações em empresas como **Saint-Gobain**.

#### **Discos de Teste**

Os discos de teste são compostos por três materiais diferentes: aço SAE 1020, borracha normal e PTFE (Teflon). Esses materiais permitem a realização de testes com diferentes propriedades de atrito e desgaste.

#### **Custos:**

- **Disco de aço SAE 1020:** R\$ 80,00 por unidade (preço médio de mercado em 2023).
- **Disco de borracha normal:** R\$ 50,00 por unidade (preço médio de mercado em 2023).
- **Disco de PTFE (Teflon):** R\$ 120,00 por unidade (preço médio de mercado em 2023).

- **Referências:**

Preços dos discos foram obtidos através de cotações em empresas como **DuPont** (PTFE) e **Gates Corporation** (borracha).

#### **Célula de Carga**

A célula de carga é um componente crítico para medição de força no tribômetro. Foi selecionada uma célula de carga comercial, garantindo precisão e confiabilidade.

#### **Custos:**

- **Célula de carga:** R\$ 300,00 por unidade (preço médio de mercado em 2023).
- **Referências:**

Preços de células de carga foram obtidos através de cotações em empresas como **HBM** e **Alfa Instrumentos**.

#### **Componentes Estruturais (Braço Principal, Pesos, Base dos Discos, Suporte Principal, Disco de Fixação)**

Esses componentes projetados para serem fabricados em aço SAE 1020 e usinados para atender às especificações geométricas do projeto.

#### **Custos:**

- **Barra de aço SAE 1020 (diâmetro 25 mm):** R\$ 100,00 por metro linear (preço médio de mercado em 2023).
- **Usinagem dos componentes:** R\$ 200,00 por conjunto (considerando usinagem CNC).
- **Referências:**

Preços de barras de aço SAE 1020 foram obtidos através de cotações em empresas como **Villares Metals**.

#### **Parafusos**

Foram utilizados parafusos comerciais em aço SAE 1020, garantindo resistência e durabilidade nas fixações.

#### **Custos:**

- **Parafusos M10 x 1,5 mm:** R\$ 2,00 por unidade (preço médio de mercado em 2023).
- **Referências:**

Preços de parafusos foram obtidos através de cotações em empresas como **Ciser** e **Belgo**.

#### **Motor WEG**

O motor selecionado foi o modelo WEG W22, com potência de 1,5 CV, tensão de 220 V e eficiência de 90%.

#### **Custos:**

- **Motor WEG W22 (1,5 CV):** R\$ 1.200,00 por unidade (preço médio de mercado em 2023).
- **Referências:**

Preços do motor foram obtidos através de cotações em empresas como **WEG**.

#### **Inversor**

O inversor escolhido foi o modelo WEG CFW100, compatível com o motor selecionado e com controle vetorial (VVW) ou escalar (V/F).

#### **Custos:**

- **Inversor WEG CFW100:** R\$ 800,00 por unidade (preço médio de mercado em 2023).

- **Referências:**

Preços do inversor foram obtidos através de cotações em empresas como **WEG**.

**Cabos**

Foram selecionados cabos de 2,5 mm<sup>2</sup>, que suportam correntes de até 24 A, garantindo segurança e eficiência na transmissão de energia.

**Custos:**

- **Cabo 2,5 mm<sup>2</sup>:** R\$ 5,00 por metro linear (preço médio de mercado em 2023).

- **Referências:**

Preços dos cabos foram obtidos através de cotações em empresas como **Prysmian** e **Ficap**.

#### **4.9 Viabilidade Econômica e Retorno do Investimento**

A viabilidade econômica de um projeto mecânico, como a construção de um tribômetro, deve ser avaliada considerando não apenas os custos de fabricação, mas também os benefícios que o equipamento pode trazer em termos de eficiência, redução de custos operacionais e potencial de geração de receita. Neste tópico, será realizada uma análise de viabilidade econômica e do retorno do investimento (ROI) para o projeto do tribômetro.

#### **4.10 Custos Totais do Projeto**

Conforme detalhado nos tópicos anteriores, o custo total estimado para a construção do tribômetro é de **R\$ 5.620,00**. Esse valor inclui materiais, processos de fabricação e componentes comerciais necessários para o funcionamento do equipamento.

#### **4.11 Benefícios e Aplicações do Tribômetro**

O tribômetro é um equipamento utilizado para medir o desgaste e o atrito entre materiais, sendo amplamente aplicado em setores como:

- **Indústria automotiva:** Testes de desgaste em componentes como freios, pneus e engrenagens.
- **Indústria aeronáutica:** Análise de materiais para componentes expostos a altas cargas e temperaturas.

- **Pesquisa acadêmica:** Estudos avançados sobre tribologia e desenvolvimento de novos materiais.
- **Controle de qualidade:** Verificação da durabilidade de materiais em linhas de produção.

A utilização do tribômetro pode trazer benefícios como:

- **Redução de custos com testes terceirizados:** Empresas que realizam testes de desgaste em laboratórios externos podem economizar significativamente ao ter um equipamento próprio.
- **Aumento da eficiência:** Testes internos permitem maior agilidade na obtenção de resultados e tomada de decisões.
- **Desenvolvimento de novos produtos:** A capacidade de testar diferentes materiais pode impulsionar a inovação e a competitividade no mercado.

#### 4.12 Estimativa de Economia com Testes Internos

Para avaliar a viabilidade econômica, considerou-se o custo médio de testes de desgaste realizados em laboratórios terceirizados. Em média, um teste de desgaste pode custar **R\$ 500,00** por amostra, dependendo da complexidade e do material analisado.

##### Cenário de Uso:

- **Número de testes por mês:** 10 testes.
- **Custo mensal com testes terceirizados:**  $10 \text{ testes} \times R500,00 = R5.000,00$ .
- **Custo anual com testes terceirizados:**  $R5.000,00 \times 12 \text{ meses} = R5.000,00 \times 12 \text{ meses} = R 60.000,00$ .

Com a aquisição do tribômetro, os testes podem ser realizados internamente, eliminando os custos com terceirização. Considerando uma vida útil de **5 anos** para o equipamento, a economia total seria:

##### Economia Total em 5 Anos:

- $R60.000,00 \text{ (anual)} \times 5 \text{ anos} = R60.000,00(\text{anual}) \times 5 \text{ anos} = R 300.000,00$ .

#### 4.13 Cálculo do Retorno do Investimento (ROI)

O retorno do investimento (ROI) é uma métrica financeira que avalia a eficiência de um investimento. Para calcular o ROI, utiliza-se a seguinte fórmula:

$$\text{ROI} = ((\text{Receita} - \text{Custo}) / \text{Custo}) \times 100$$

Onde:

- **Benefício Líquido:** Economia total em 5 anos menos o custo do equipamento.
- **Investimento Inicial:** Custo total do tribômetro (R\$ 5.620,00).

**Cálculo:**

- **Benefício Líquido:**  $R300.000,00 - R300.000,00 - R5.620,00 = R294.380,00$ .
- **ROI:**  $294.380 / 5.620 \times 100 = 5.237\%$ .

Esse valor indica que, ao longo de 5 anos, o retorno do investimento será de **5.237%**, o que demonstra a alta viabilidade econômica do projeto.

#### 4.14 Payback (Tempo de Retorno do Investimento)

O payback é o tempo necessário para recuperar o investimento inicial. Para calcular o payback, divide-se o investimento inicial pela economia mensal gerada pelo equipamento.

**Cálculo:**

- **Economia mensal:** R\$ 5.000,00.
- **Payback:**  $5.620 / 5.000 = 1,124$  meses.

Isso significa que o investimento no tribômetro será recuperado em aproximadamente **1 mês e 4 dias**, considerando a economia gerada com a eliminação de testes terceirizados.

#### 4.15 Análise de Sensibilidade

Para garantir a robustez da análise, foi realizada uma simulação de cenários com variações nos custos de testes terceirizados e no número de testes mensais.

**Cenário 1: Redução de 20% no Custo de Testes Terceirizados**

- **Custo por teste:** R\$ 400,00.
- **Economia mensal:**  $10 \text{ testes} \times R400,00 = R4.000,00$ .

- **Payback:**  $5.6204.000=1,44.0005.620=1,4$  meses (1 mês e 12 dias).

#### **Cenário 2: Aumento de 20% no Número de Testes Mensais**

- **Número de testes:** 12 testes.
- **Economia mensal:** 12 testes x R500,00=R500,00=R 6.000,00.
- **Payback:**  $5.6206.000=0,946.0005.620=0,94$  meses (28 dias).

Esses cenários demonstram que, mesmo com variações nos custos ou na demanda, o projeto continua altamente viável.

#### **4.16 Conclusão da análise econômica**

A análise de viabilidade econômica e retorno do investimento demonstra que a construção do tribômetro é um projeto altamente vantajoso. Com um custo inicial de R\$ 5.620,00, conforme precificação realizada em abril de 2025, considerando a cotação do dólar em aproximadamente R\$ 5,84, o equipamento proporciona uma economia significativa ao eliminar a necessidade de testes terceirizados. Estima-se um payback de aproximadamente 1 mês e um retorno sobre o investimento (ROI) de 5.237% em 5 anos. Além disso, a capacidade de realizar testes internos agiliza processos, aumenta a eficiência e impulsiona a inovação, tornando o projeto não apenas viável, mas também estratégico para empresas e instituições de pesquisa.

### **5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES**

#### **5.1 Conclusões**

Este projeto desenvolveu com sucesso um tribômetro pino-disco virtual utilizando o software SolidWorks, atendendo aos requisitos da norma ASTM G99-17 e resolvendo a problemática proposta. A solução projetada demonstra capacidade para simular condições controladas de atrito e desgaste, permitindo medições precisas do coeficiente de atrito e taxas de desgaste entre materiais.

Através de modelagem 3D foi possível garantir características essenciais como estabilidade operacional, perfeito alinhamento pino-disco e facilidade de troca de amostras. O projeto virtual desenvolvido apresenta viabilidade técnica para futura construção física, com potencial para se tornar uma ferramenta acessível para pesquisas tribológicas.

O trabalho cumpriu integralmente seus objetivos, desde a fundamentação teórica até a modelagem computacional detalhada, gerando documentação técnica completa que inclui memoriais de cálculo, especificações técnicas e análise econômica. Os resultados obtidos

validam a metodologia adotada e abrem perspectivas para desenvolvimentos futuros, tanto na implementação física do equipamento quanto na expansão de suas capacidades de ensaio.

## 5.2 Recomendações

A partir do trabalho realizado, algumas recomendações e propostas para futuros estudos e aprimoramentos podem ser sugeridas:

**Construção Física do Tribômetro:** Uma recomendação importante seria a construção física do tribômetro projetado, permitindo a validação experimental dos resultados obtidos nas simulações. Isso possibilitaria a comparação entre os dados teóricos e práticos, além de ajustes finos no projeto.

**Expansão para Outros Tipos de Ensaio Tribológicos:** O equipamento poderia ser adaptado virtualmente para realizar outros tipos de ensaios, como desgaste por erosão ou fadiga, ampliando sua aplicabilidade em diferentes áreas da engenharia.

**Análise de Lubrificantes e Aditivos:** Outra linha de pesquisa seria a análise do efeito de diferentes lubrificantes e aditivos no coeficiente de atrito e na taxa de desgaste, contribuindo para o desenvolvimento de soluções mais eficientes em termos de redução de atrito e desgaste. Esses estudos poderiam ser iniciados com simulações no SolidWorks.

Essas recomendações visam expandir as aplicações do tribômetro e contribuir para o avanço dos estudos tribológicos, tanto no âmbito acadêmico quanto industrial, mesmo que o projeto tenha sido realizado apenas em ambiente virtual.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDER-EGG, Ezequiel. **Introducción a las técnicas de investigación social: para trabajadores sociales**. 7. ed. Buenos Aires: Humanitas, 1978.
- ASM Handbook. (Ed.) **Surface Engineering for Corrosion and Wear Resistance**, ASM International, 2001.
- BAYER, Raymond G. **Mechanical Wear: Fundamentals and Testing**. Marcel Decker: New York, 395p., 2004.
- BHUSHAN, B. **Modern Tribology Handbook. Vol. 1 – Principles of Tribology**. CRC Press, 2001.
- BLAU, P., J., **Friction Science and Technology: from concepts to applications**. 2ª ed., CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 2009.
- CHLUM, B.; Hanson, K.; Lindsay, S.; e Pascoe, B. **Multi-Function Tribometer Design**. 2010
- Creswell, J.W. (2003) **Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Method Approaches**. Sage Publications, Thousand Oaks.
- CUEVA GALÁRRAGA, Edison Gustavo. **Estudo do desgaste em materiais utilizados em discos de freio de ferro fundido com grafita lamelar e vermicular**. 2002. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002. . Acesso em: 28 jun. 2023
- DOWSON, D. **History of tribology**. London: Longman, 1979.
- EYRE, T. S. **The mechanisms of wear**. Tribology International, v. 11, n. 2, p. 91–96, 1978.
- FONSECA, J. J. S. **Metodologia da pesquisa científica**. Fortaleza: UEC, 2002. Apostila.
- GIL, A. C . **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2007.
- Gil, Antônio Carlos, 1946- **Como elaborar projetos de pesquisa/Antônio Carlos Gil**. - 7. ed. - São Paulo : Atlas, 2022
- GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2008.
- GOLDENBERG, M. **A arte de pesquisar**. Rio de Janeiro: Record, 1997.
- HERNÁNDEZ, O. J. S. **Otimização do Consumível na Solda de Revestimento Aplicada na Indústria Sucroalcooleira**. Universidade Federal de São Carlos. Dissertação de Mestrado. 102 p. 1997.
- Holmberg, K., Erdemir, A. **Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions**. *Friction* **5**, 263–284 (2017)
- HUTCHINGS, I. M.; Tribology – **Friction and Wear of Engineering Materials**; Edward Arnold Publications, London, U. K., 1992
- Jost, H.P. (2006). Tribology : **How a word was coined 40 years ago**. Tribology & Lubrication Technology, 62, 24-28.
- Livro - **Ensaio dos Materiais** - Garcia ; Edição: 2 ; Ano: 2012 ; Idioma: Português ; Autor: Garcia ; Páginas: 382
- LOZADA, G.; NUNES, K. S. **Metodologia científica**. Porto Alegre: SAGAH, 2018.
- MARCONI, M.; LAKATOS, E. **Fundamentos de metodologia científica**. [S.l: s.n.], 2003.

- METODOLOGIA DO, T. **Metodologia do Trabalho Científico** - 9 Edicao/2021 - Eva Maria Lakatos e Marina Marconi. [s.d.].
- NORTON, R. **Projeto de Máquinas**. 2ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2004.409 -428p.
- NORTON, R.L. **Projeto de Máquinas: Uma Abordagem Integrada**. 4ª Ed. Ed: Grupo A, 2013.
- ARCIA, 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.
- OLIVEIRA, M. DOS A. **Desgaste abrasivo do aço hadfield com diferentes teores de carbono em abrasômetro do tipo pino dsico**. [s.l.] Universidade Federal de Pernambuco, jul. 2016.
- OLIVEIRA, Sílvio Luiz. **Tratado de metodologia científica: Projetos de pesquisas**, TGI, TCC, monografias, dissertações e teses. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2002.
- Pulikkalparambil, H., Babu, A., Thilak, A., Vighnesh, N.P., Rangappa, S.M., Siengchin, S. **A review on sliding wear properties of sustainable biocomposites: Classifications, fabrication and discussions** (2023).
- RABINOWICZ E. **The least wear**. *Wear*, v. 100, p. 533-541, 1984.
- Stachowiak, G. W, Batchelor, A. W e Stachowiak, G. B. **Experimental Methods in Tribology**. Academic Press, Elsevier (2004).
- STOETERAU, R. L.. **Apostila de Tribologia**. Departamento de Engenharia Mecânica- Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.
- Surface effects in adhesion, friction, wear, and lubrication**. 1st Edition - January 1, 1981. Author: Donald Buckley
- TYRKIEL, E.; **INSTITUTE OF MATERIALS; INTERNATIONAL FEDERATION FOR HEAT TREATMENT AND SURFACE ENGINEERING (EDS.)**. A guide to surface engineering terminology. London: Institute of Metals in association with the IFHT, 1995.
- Holmberg, Kenneth, and Ali Erdemir. "Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions." *Friction* 5 (2017): 263-284.
- HOLMBERG, Kenneth; ERDEMIR, Ali. Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions. **Friction**, v. 5, p. 263-284, 2017.
- Holmberg, K., & Erdemir, A. (2017). Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions. *Friction*, 5, 263-284.

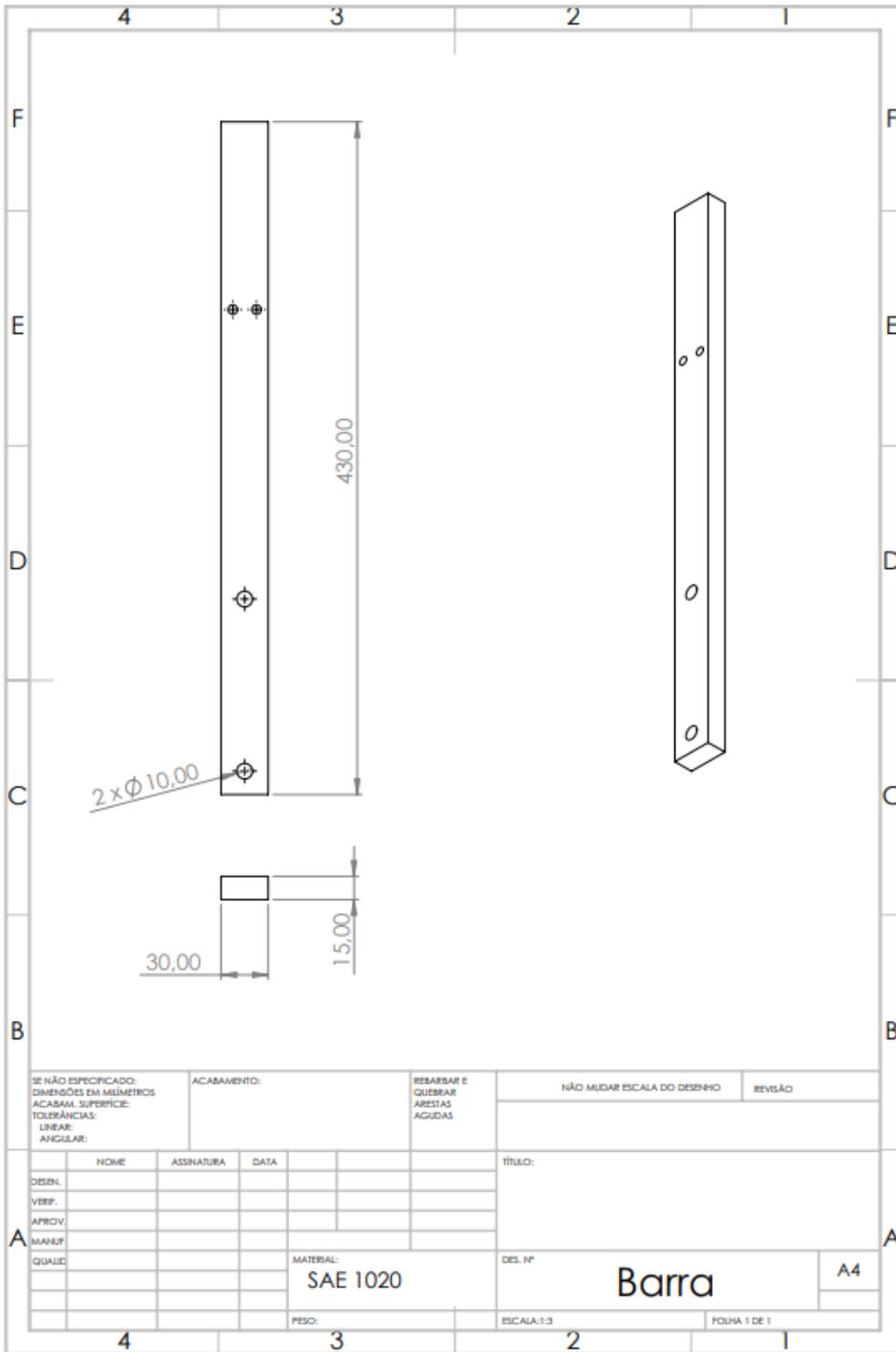
# APENDICE A

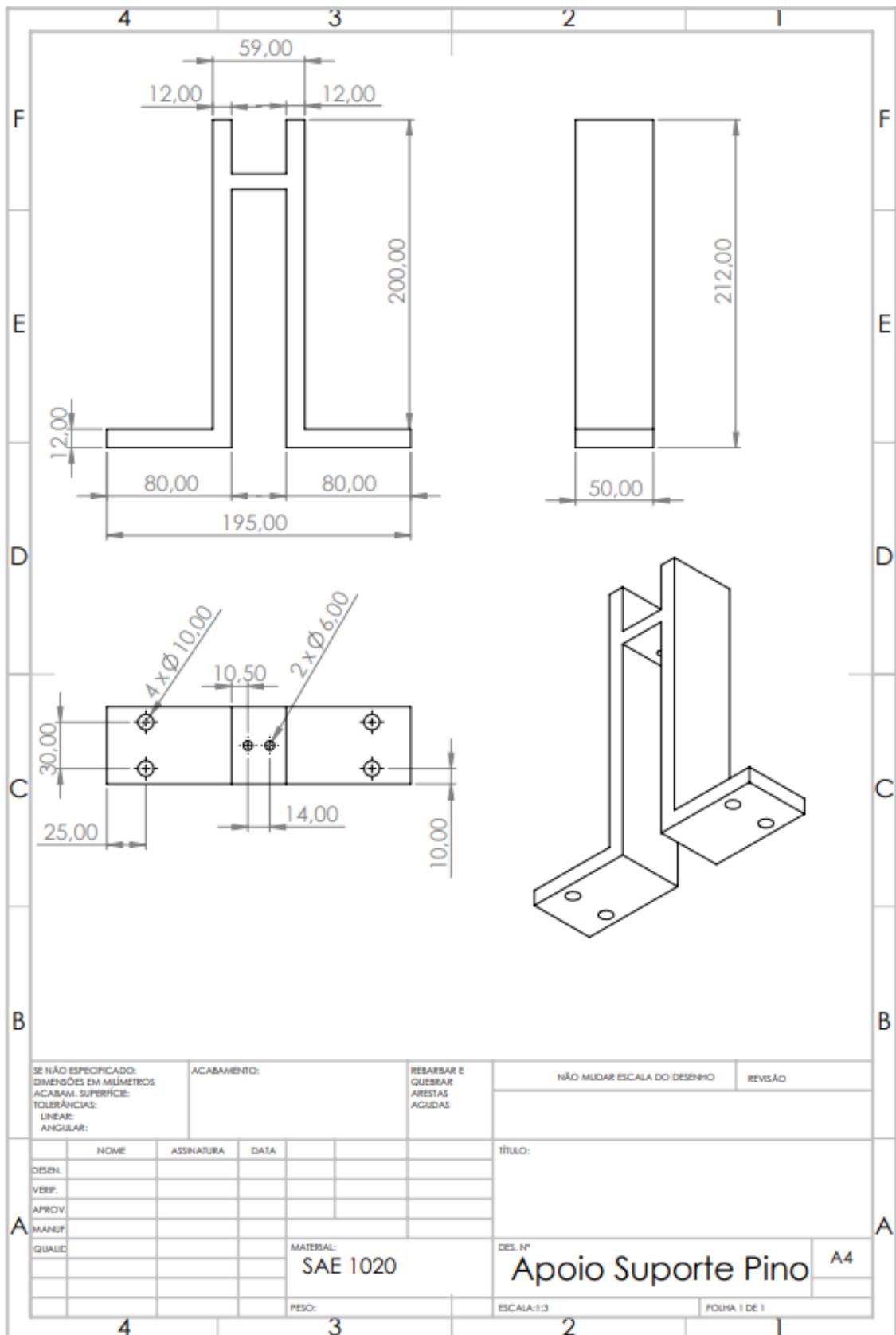
## Desenhos Técnicos do Tribômetro

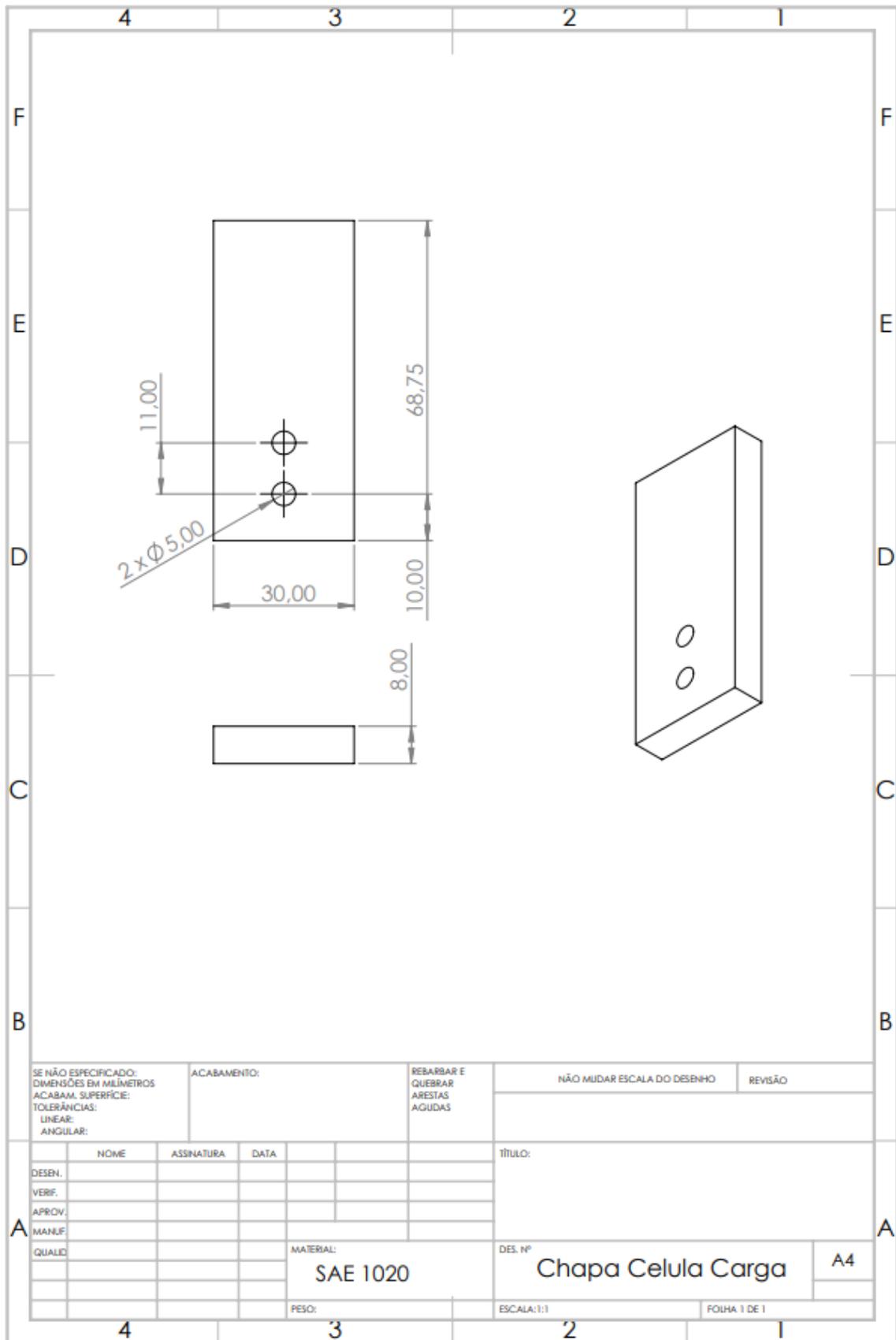
| Nº DO ITEM | Nº DA PEÇA   | DESCRIÇÃO                        | Material     | Peso      | QTD. |
|------------|--|----------------------------------|--------------|-----------|------|
| 1          | REV1-PM-007  | Montagem estrutura + fechamentos |              | 187884.91 | 1    |
| 1.1        | REV1-PP-001  | Tubo Retangular 50 x 30 x 2,6mm  | AISI 1020    |           | 1    |
| 1.2        | REV1-PM-010  | Fechamentos                      |              | 158758.79 | 1    |
| 1.2.1      | REV1-PP-028  | Chapa Dobrada 1/4"               | ASTM A36 Apo | 126048.97 | 1    |
| 1.2.2      | REV1-PP-027  | Chapa 1/4"                       | AISI 1020    | 32709.82  | 1    |
| 1.3        | REV1-PP-003  | Chapa 1/4"                       | ASTM A36     |           | 4    |
| 1.4        | REV1-Pê Nivelador M10x30                                 | Pê nivelador                     | Liga de aço  |           | 4    |
| 1.5        | REV1-PP-029  | Chapa 1/4"                       | AISI 1020    |           | 2    |
| 2          | REV1-PM-001  | Suporte + pino                   |              |           | 1    |
| 2.1        | REV1-PP-004  | Suporte                          | AISI 1020    |           | 1    |
| 2.2        | REV1-PP-005  | Tanugo Ret. 30x15mm              | AISI 1020    |           | 1    |
| 2.3        | REV1-PP-006  | Suporte Pino 01                  | AISI 1020    |           | 1    |
| 2.4        | REV1-PP-007  | Peso 0,5kg                       | AISI 1020    |           | 1    |
| 2.5        | REV1-PP-008  | Barra rosçada 12mm               | AISI 1020    |           | 4    |
| 2.6        | REV1-PP-009  | Suporte Pino 02                  | AISI 1020    |           | 1    |
| 2.7        | REV1-PM-009  | Pino                             |              | 27.26     | 1    |
| 2.7.1      | REV1-PP-026  | Amostra                          | Alumina      | 0.53      | 1    |
| 2.7.2      | REV1-PP-010  | Suporte Amostra                  | AISI 1020    |           | 1    |
| 2.8        | REV1-PP-011  | Chapa 5mm                        | AISI 1020    |           | 1    |
| 3          | REV1-PM-002  | Caixa de controle - NR-12        |              |           | 1    |
| 4          | REV1-PM-008  | Motor + Acoplamentos disco       |              | 8452.15   | 1    |
| 4.1        | REV1-PM-006  | Acoplamento + Disco              |              | 1750.52   | 1    |
| 4.1.1      | REV1-PM-003  | Acoplamento + Eixo               |              |           | 1    |
| 4.1.1.1    | REV1-PP-023  | Acoplamento E11221_08_24         | AISI 1020    | 271.48    | 2    |
| 4.1.1.2    | REV1-PP-024  | anel de borracha E11221_08_24    | Borracha     | 5.77      | 1    |
| 4.1.1.3    | REV1-PP-025  | Eixo 5,5mm                       | Liga de aço  |           | 1    |
| 4.1.2      | REV1-PM-005  | Disco + Fixação                  |              | 1011.54   | 1    |
| 4.1.2.1    | REV1-PP-012  | Suporte Disco                    | AISI 1020    |           | 1    |
| 4.1.2.2    | REV1-PP-013  | Disco                            | AISI 1020    |           | 1    |
| 4.1.2.3    | REV1-DIN 912 - parafuso sextavado interno M4 x 0,7 x 25  |                                  |              |           | 3    |
| 4.2        | LOGS_LEFT  |                                  |              |           | 1    |
| 5          | REV1-DIN 912 - parafuso sextavado interno M10 x 1,5 x 40 |                                  |              |           | 4    |
| 6          | REV1-DIN 127 B - arnela de pressao M10                   |                                  |              |           | 16   |
| 7          | REV1-DIN 985 - porca inserto nylon M10                   |                                  |              |           | 10   |
| 8          | REV1-Barra rosçada M6 x 1,5 x 130                        |                                  |              |           | 2    |
| 9          | REV1-Barra rosçada M6 x 1,5 x 90                         |                                  |              |           | 2    |

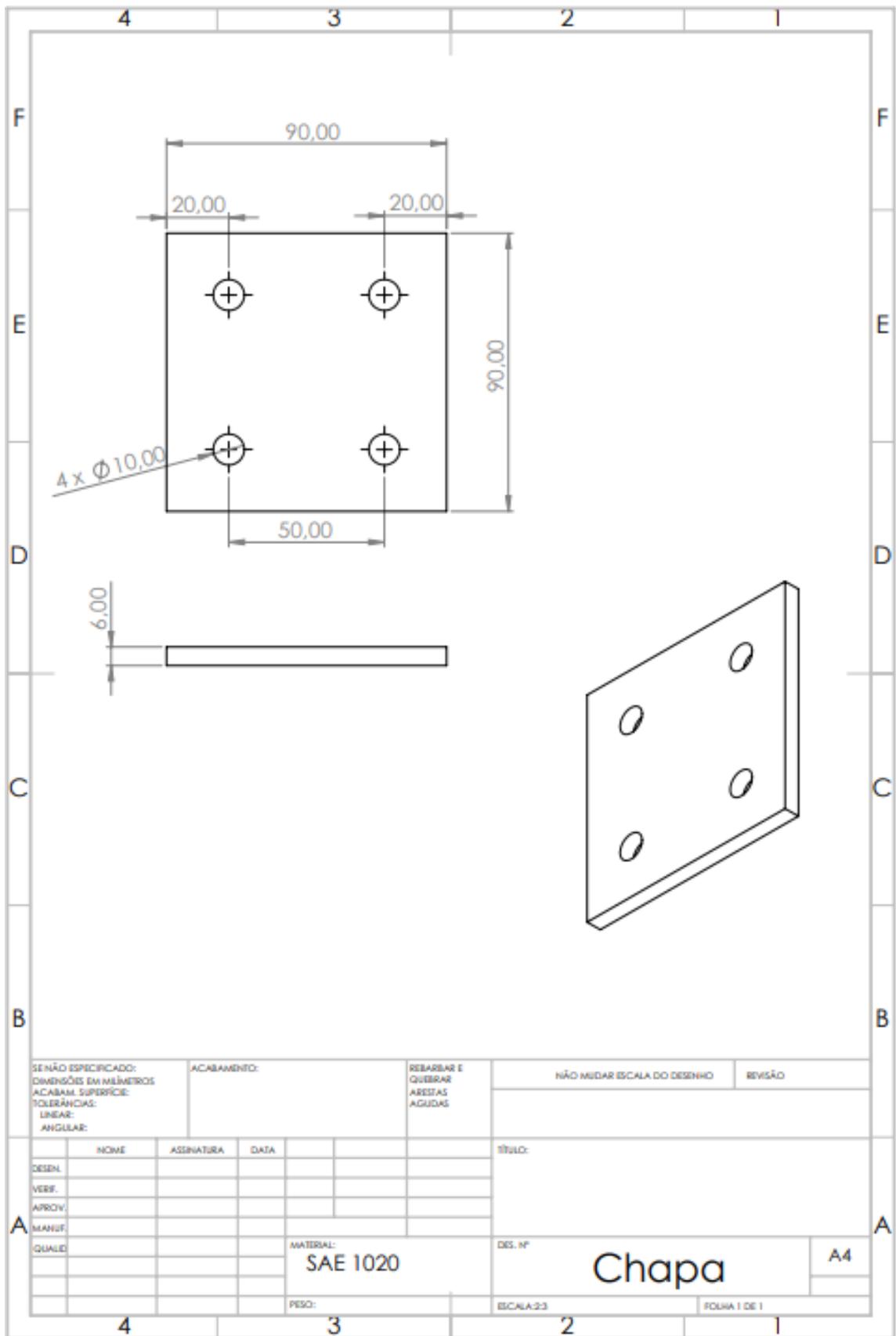
ESCALA INDICADA

| CONSULTORIA & SERVIÇOS DE ENGENHARIA  |              |            | ESPECIFICAÇÕES PROJETO                   |      |           |
|---|--------------|------------|--|------|-----------|
| PROJETO   | NOME         | DATA       | CLIENTE                                  | PESO | PROJETO   |
| RESPONSÁVEL   | MATEUS RAMOS | 05/07/2016 | QUANTIDADE                               |      | ARTIFICAL |
| ENGENHEIRO  |              |            | ESCALA                                   |      | PAIS      |
| PROJETISTA  |              |            | REVISÃO                                  |      | UNIDADE   |
|   |              |            |  |      | DATA      |
| ESTE DOCUMENTO É DE PROPRIEDADE DE MR ENGENHARIA. A REPRODUÇÃO, USO OU DIVULGAÇÃO A TERCEIROS NÃO DEVE SER FEITA SEM PRÉVIA AUTORIZAÇÃO |              |            | FORMATO: A3 COM VISTA NO PRIMEIRO DEBIDO |      |           |
|   |              |            | TÍTULO:                                  |      |           |

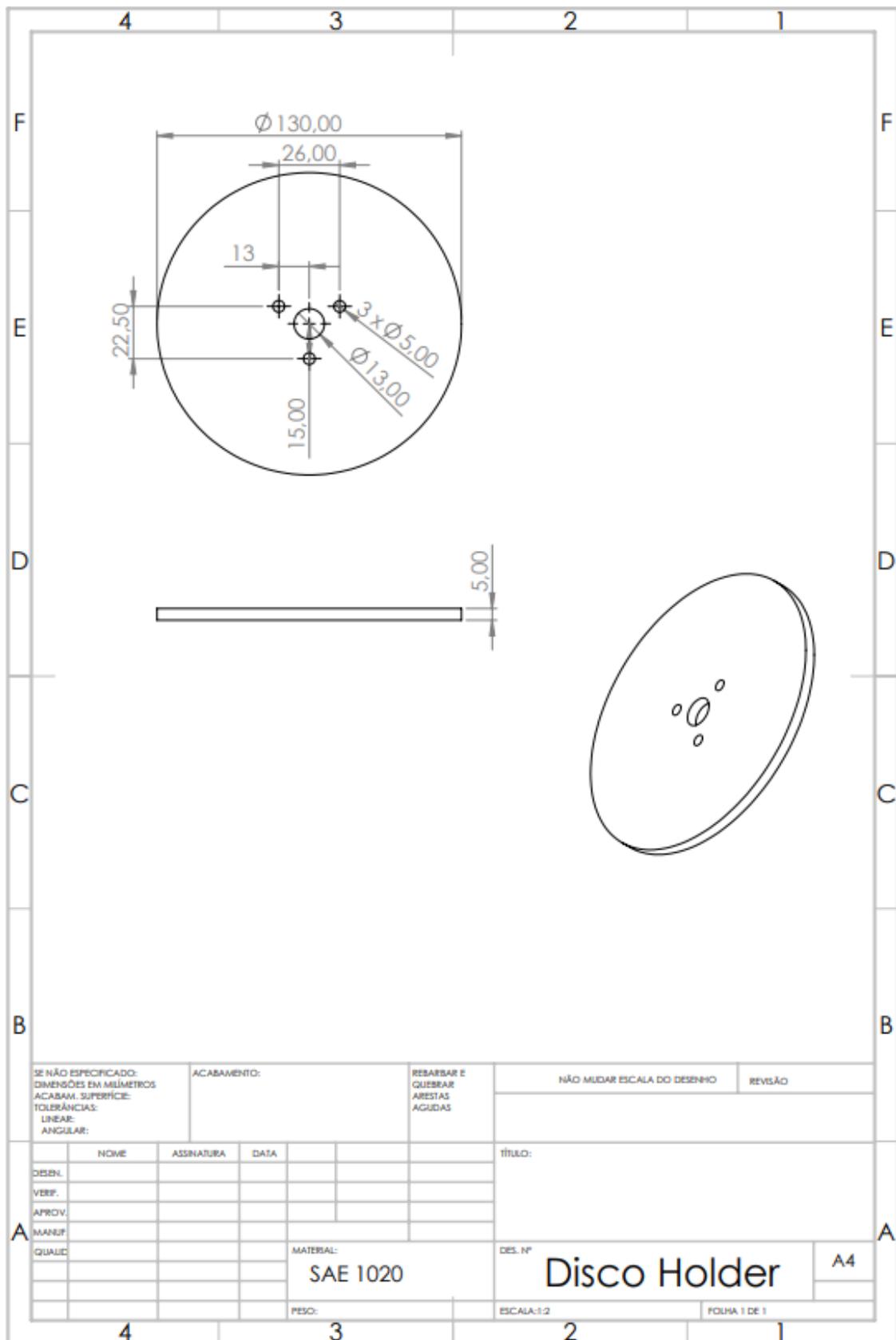








|  |  |             |  |  |  |                              |  |                         |  |
|--|--|-------------|--|--|--|------------------------------|--|-------------------------|--|
| SENAO ESPECIFICADO:<br>DIMENSÖES EM MILIMETROS<br>ACABAM. SUPERFICIE:<br>TOLERANCIAS:<br>LINEAR:<br>ANGULAR: |  | ACABAMENTO: |  | REBARBAR E<br>QUEBRAR<br>ARESTAS<br>AGUDAS |  | NÃO MUDAR ESCALA DO DESENHO  |  | REVISÃO                 |  |
| DESIGN.  |  | ASSINATURA  |  | DATA                                       |  | TÍTULO:                      |  |                         |  |
| VERS.  |  |             |  |  |  |                              |  |                         |  |
| APROV.   |  |             |  |  |  |                              |  |                         |  |
| MANTEN.  |  |             |  |  |  |                              |  |                         |  |
| QUALID.  |  |             |  |  |  | MATERIAL:<br><b>SAE 1020</b> |  | DES. Nº<br><b>Chapa</b> |  |
|  |  |             |  |  |  | PESO:                        |  | ESCALA: 2:3             |  |
|  |  |             |  |  |  |                              |  | FOLHA 1 DE 1            |  |



SE NÃO ESPECIFICADO:  
DIMENSÕES EM MILÍMETROS  
ACABAM. SUPERFÍCIE:  
TOLERÂNCIAS:  
LINEAR:  
ANGULAR:

ACABAMENTO:

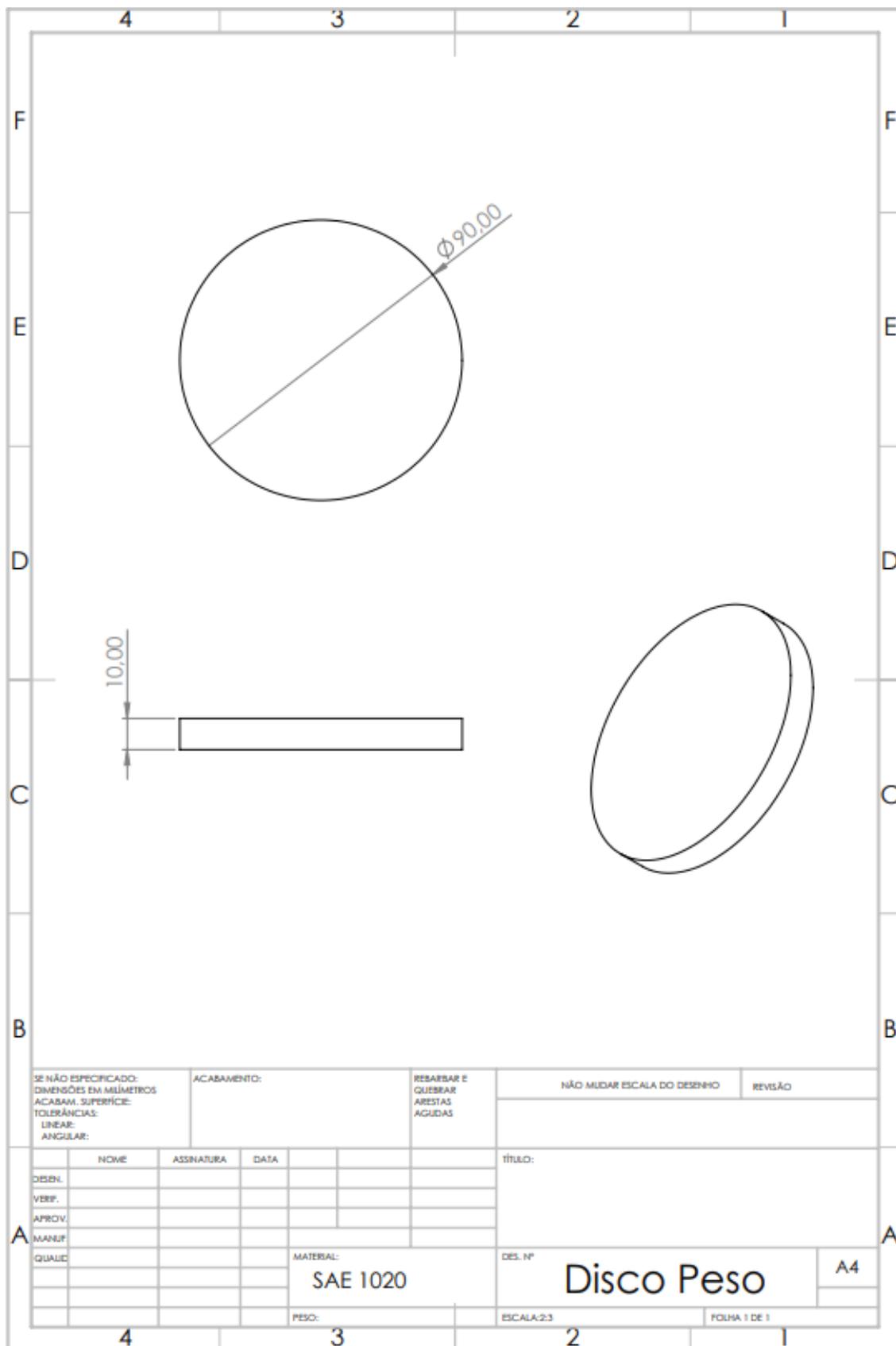
RESBARBAR E  
QUEBRAR  
ARESTAS  
AGUDAS

NÃO MUDAR ESCALA DO DESENHO

REVISÃO

|         | NOME | ASSINATURA | DATA |           |  |
|---------|------|------------|------|-----------|--|
| DESEN.  |      |            |      |           |  |
| VERIF.  |      |            |      |           |  |
| APROV.  |      |            |      |           |  |
| MANUF.  |      |            |      |           |  |
| QUALIF. |      |            |      |           |  |
|         |      |            |      | MATERIAL: |  |
|         |      |            |      | SAE 1020  |  |
|         |      |            |      | PESO:     |  |

|             |              |
|-------------|--------------|
| TÍTULO:     |              |
| DES. Nº     | Disco Holder |
| ESCALA: 1:2 | FOLHA 1 DE 1 |
|             | A4           |



|   |      |             |  |                             |              |
|---|------|-------------|--|-----------------------------|--------------|
| SE NÃO ESPECIFICADO:<br>DIMENSÕES EM MILÍMETROS<br>ACABAM. SUPERFÍCIE:<br>TOLERÂNCIAS:<br>LINEAR:<br>ANGULAR: |      | ACABAMENTO: | REBARBAR E<br>QUEBRAR<br>ARESTAS<br>AGUDAS | NÃO MUDAR ESCALA DO DESENHO | REVISÃO      |
| DESEN.  | NOME | ASSINATURA  | DATA                                       | TÍTULO:                     |              |
| V.B.F.  |      |             |  |                             |              |
| APROV.  |      |             |  |                             |              |
| MANUF.  |      |             |  |                             |              |
| QUALID.   |      |             |  | MATERIAL:                   | DES. Nº      |
|   |      |             |  | SAE 1020                    | Disco Peso   |
|   |      |             |  | PESO:                       | ESCALA:2:3   |
|   |      |             |  |                             | FOLHA 1 DE 1 |

