

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

ANDERSON INÁCIO JUNQUEIRA JÚNIOR

**PROJETO, CONSTRUÇÃO E VALIDAÇÃO DE UM EQUIPAMENTO PARA
SEPARAR PARTÍCULAS DE DESGASTE EM LUBRIFICANTES**

Ilha Solteira

2016

ANDERSON INÁCIO JUNQUEIRA JÚNIOR

**PROJETO, CONSTRUÇÃO E VALIDAÇÃO DE UM EQUIPAMENTO PARA
SEPARAR PARTÍCULAS DE DESGASTE EM LUBRIFICANTES**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira- UNESP, como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica.
Área de Conhecimento: Mecânica dos Sólidos.

**Prof. Dr. Aparecido Carlos Gonçalves
Orientador**

Ilha Solteira

2016

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

- J957p Junqueira Júnior, Anderson Inácio.
Projeto, construção e validação de um equipamento para separar partículas de desgaste em lubrificantes / Anderson Inácio Junqueira Júnior. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2016
146 f. : il.
- Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia . Área de conhecimento: Mecânica dos Sólidos, 2016
- Orientador: Aparecido Carlos Gonçalves
Inclui bibliografia
1. Manutenção preditiva. 2. Análise de lubrificantes. 3. Ferrografia.
4. Separador rotativo de partículas.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Projeto, Construção e Validação de um Equipamento para separar partículas de desgastes em lubrificantes

AUTOR: ANDERSON INÁCIO JUNQUEIRA JUNIOR

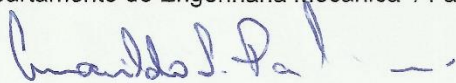
ORIENTADOR: APARECIDO CARLOS GONCALVES

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em ENGENHARIA MECÂNICA, área: MECANICA DOS SÓLIDOS pela Comissão Examinadora:



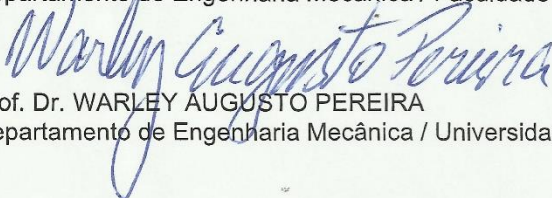
Prof. Dr. APARECIDO CARLOS GONCALVES

Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dr. AMARILDO TABONE PASCHOALINI

Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dr. WARLEY AUGUSTO PEREIRA

Departamento de Engenharia Mecânica / Universidade de Rio Verde

Ilha Solteira, 04 de agosto de 2016

DEDICO,

Ao meu falecido avô **Agenor Inácio
Junqueira** que me ensinou que nunca se deve
medir esforços aos estudos e sempre dar o
melhor de si.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida, pela saúde física e força espiritual para realização deste trabalho.

Aos meus pais Anderson Inácio Junqueira e Nilda Bueno da Silva Inácio Junqueira ao amor, incentivo e apoio incondicional.

Aos meus amigos que conviveram comigo durante a minha passagem na Ilha Solteira, especialmente aos companheiros Carlos Eduardo, Thalles Denner, Edson Roberto, Paulo Henrique, Diogo Batista e Rodrigo Borges que conviveram comigo durante caminhada árdua à Ilha Solteira.

A todos os professores do programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Estadual Paulista - Campus de Ilha Solteira, pela aprendizagem, especialmente ao meu orientador Aparecido Carlos Gonçalves, pela amizade, paciência e confiança em meu trabalho.

A Universidade de Rio Verde - UniRV, em especial aos diretores da faculdade de Engenharia Mecânica professor Dr. Warley Augusto Pereira, Ms. João Pires e Ms. Giancarlo Ribeiro, por proporcionaram meios para que pudesse cursar as disciplinas e pela confiança no meu trabalho na Universidade de Rio Verde.

Ao Pedro Henrique Queiroz pela amizade e respaldo para a realização dos ensaios.

A todos que contribuíram diretamente para a realização deste trabalho, o meu muito obrigado.

"Não se deve ir atrás de objetivos fáceis, é preciso buscar o que só pode ser alcançado por meio dos maiores esforços." Albert Einstein

RESUMO

O presente trabalho apresenta um projeto e construção de um protótipo para separar partículas de desgaste em óleos lubrificantes. Devido à necessidade da confiabilidade de máquinas e equipamentos para a redução de custos fabris, as indústrias recorreram às ações preditivas de manutenção. Dentre as várias ações preditivas de manutenção pode-se citar a análise de lubrificantes. Lubrificantes são materiais colocados entre duas superfícies interativas afim de preencher as irregularidades superficiais, assim reduzindo o atrito e o desgaste. Os lubrificantes podem ser sólidos, semifluidos e fluidos. O óleo é um lubrificante líquido, partículas de desgaste presentes no óleo podem danificar componentes vitais de máquinas. Um método utilizado para analisar as partículas de desgaste presentes no óleo lubrificante é a ferrografia qualitativa. Com base em fundamentos teóricos de obras renomadas no meio científico, o objetivo do presente trabalho é projetar e construir um protótipo separador rotativo de partículas de baixo custo, para obter ferrogramas quantitativos de boa qualidade e comparar com os modelos convencionais encontrados no mercado. Através de cinco combinações diferentes de ímãs permanentes foi possível obter ferrogramas, sendo que as combinações 03, 04 e 05 apresentaram melhor qualidade de formação de anéis de partículas ferrosas. A combinação 04 apresentou apenas dois anéis, estes são mais fidedignos em relação aos anéis do aparelho convencional.

Palavras-chave: Manutenção preditiva. Análise de lubrificantes. Ferrografia. Separador rotativo de partículas.

ABSTRACT

This paper presents a project and construction of a prototype to separate wear particles in lubricating oils. Due to the need for reliability of machines and equipment to reduce manufacturing costs, manufacturers have turned to predictive maintenance actions. Among the various predictive maintenance actions can be cited the analysis of lubricants. Lubricants are interactive material placed between two surfaces in order to fill the surface irregularities, thereby reducing friction and wear. The lubricants may be solid, slurries and fluids. The oil is a liquid lubricant, wear particles in the oil can damage critical components of machinery. A method for analyzing wear particles in the lubricating oil is qualitative ferrography. Based on theoretical foundations of renowned works in the scientific environment, the objective of this work is to project and construct a rotary separator prototype low cost particles for quantitative ferrogramas good quality and compare with conventional models available on the market. Through five different combinations of permanent magnets was possible to obtain ferrogramas, and combinations 03, 04 and 05 showed better quality training rings of ferrous particles. The combination 04 had only two rings, these are more reliable with respect to the rings of the conventional device.

Keywords: Predictive maintenance. Analysis of lubricants. Ferrography. Rotating particle separator.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Custos de manutenção em relação ao faturamento e ao patrimônio.....	22
Figura 2 - Composição dos custos de manutenção.....	23
Figura 3 - Confiabilidade x Custos.....	24
Figura 4 - Custos x Nível de Manutenção.	24
Figura 5 - Lucro x Disponibilidade.	25
Figura 6 - Rugosidade e atrito.	31
Figura 7 - Viscosidade dinâmica	38
Figura 8 - Modos de desgaste.....	45
Figura 9 - Separador de partículas linear.....	46
Figura 10 - Separador de partículas rotativo e o ferrograma obtido.....	47
Figura 11 - Separador de partículas rotativo e o ferrograma obtido.....	49
Figura 12 - Momentos magnéticos.	50
Figura 13 - Linhas de força.	51
Figura 14 - Representação do campo magnético temporário.	52
Figura 15 - Motor elétrico de corrente contínua de ímã permanente com escovas.....	55
Figura 16 - Vista explodida de algumas partes do protótipo.....	56
Figura 17 - Base de teste.....	57
Figura 18 - Conjunto de fixação da lamínula.	59
Figura 19 - Apoio do copo base e a haste de fixação.	61
Figura 20 - Componentes eletrônicos e as devidas ligações.	65
Figura 21 - Arduino modelo Mega 2560.....	66
Figura 22 - Disposição de linhas e colunas do teclado matricial de membrana.....	68
Figura 23 - Display LCD 16x2 RT162-7.	69
Figura 24 - Módulo Serial I2C.	69
Figura 25 - Conjunto motor elétrico-redutor adotado.	71
Figura 26 - Circuito elétrico de Ponte H.	72
Figura 27 - Ligações elétricas.....	74
Figura 28 - Case de polimetilmetacrilato.....	75
Figura 29 - Combinações utilizadas para os ensaios.	82
Figura 30 - Ventosa utilizada para fixar a lamínula.	83
Figura 31 - Forno mufla utilizado.	84
Figura 32 - Pipeta dosadora e respectivas pontas.....	84

Figura 33 - Ferrosκόpio.	85
Figura 34 - Formação de partículas de desgaste sobre a lamínula.	86
Figura 35 - Ferrogramas obtidos com as respectivas amostras e combinações.....	87
Figura 38 - Comprimento efetivo de flambagem.	133
Figura 39 - Esforços da haste de movimentação.	133
Figura 40 - Esforços Atuantes.	134
Figura 41 - Típicas partículas de desgaste	146

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Evolução da Manutenção.	21
Quadro 2 - Comparação 01.....	89
Quadro 3 Comparação 02	90
Quadro 4 - Comparação 03.....	93
Quadro 5 - Comparação 04.....	94
Quadro 6 - Comparação 05.....	95
Quadro 7 - Comparação 06.....	97
Quadro 8 - Comparação 07.....	98
Quadro 9 - Comparação 08.....	99
Quadro 10 - Comparação 09.....	100
Quadro 11 - Comparação 10.....	102
Quadro 12 - Comparação 11.....	103
Quadro 13 - Comparação 12.....	104
Quadro 14 - Comparação 13.....	105
Quadro 15 - Comparação 14.....	106
Quadro 16 - Comparação 15.....	107

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Impacto do espessante nas propriedades das graxas.	33
Tabela 2 - Características de normas tribotécnicas.	34
Tabela 3 - Graus de viscosidade.	35
Tabela 4 - Classes de consistência.	35
Tabela 5 - Características de normas tribotécnicas.	36
Tabela 6 - Classificação API de óleos para motores de ciclo Otto.	40
Tabela 7 - Classificação SAE J300 para óleo de motores.	42
Tabela 8 - Classificação ISO para óleos industriais.	43
Tabela 9 - Ligas de estanho e chumbo e aplicações.	70
Tabela 10 - Relação entre velocidade de programação, tensão e rotação.	73
Tabela 11 - Ímãs adquiridos para os ensaios.	79
Tabela 12 - Características dos ímãs adquiridos para ensaios.	80
Tabela 13 - Ímãs utilizados na combinação 01.	80
Tabela 14 - Ímãs utilizados na combinação 02.	81
Tabela 15 - Ímãs utilizados na combinação 03.	81
Tabela 16 - Ímãs utilizados na combinação 04.	81
Tabela 17 - Ímãs utilizados na combinação 05.	82
Tabela 18 - Mensurações dos campos magnéticos das superfícies	88
Tabela 19 - Potência mínima.	138
Tabela 20 - Componentes elétricos e eletrônicos adquiridos para construção do protótipo. .	142
Tabela 21 - Case de polimetilmetacrilato e base suporte rotativo.	143
Tabela 22 - Materiais adquiridos para usinagem.	143
Tabela 23 - Serviço de usinagem.	144
Tabela 24 - Equipamentos adquiridos para projeto	144
Tabela 25 - Custo dos ímãs adquiridos para o projeto	145

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Amper (Corrente Elétrica)
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Abraman	Associação brasileira de manutenção e gestão de ativos
ANSI	American National Standards Institute (Instituto Nacional Americano de Normas)
API	American Petroleum Institute (Instituto Americano de Petróleo)
CAD	Computer Aided Design (Desenho Assistido por Computador)
DIN	Deutsches Institut für Normung (Instituto Alemão de Normalização)
EEPROM	Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory (Memória Programável Somente de Leitura Apagável Eletricamente)
GND	Ground (Terra ou Carga Negativa)
GTAW	Gas Tungsten Arc Welding (Soldagem por Arco de Gás de Tungstênio)
I2C	Inter Integrated Circuit (Circuito Inter-Integrados)
ISO	International Organization for Standardization (Organização Internacional para Padronização)
LCD	Liquid Crystal Display (Display de Cristal Líquido)
LED	Light Emitting Diode (Diodo Emissor de Luz)
NBR	Norma Brasileira
PWM	Pulse Width Modulation (Modulação por Largura de Pulso)
RCM	Reliability Centred Maintenance (Manutenção Centrada na Confiabilidade)
RPD	Rotary Particle Depositor (Separador Rotativo de Partículas)
RPM	Rotações por minuto
SAE	Society of Automotive Engineers (Sociedade dos Engenheiros Automotivos)
SCL	Serial Clock (Linha Serial de <i>Clock</i>)
SDA	Serial Data (Linha Serial de Dados)
SRAM	Static Random Access Memory (Memória de Acesso Aleatório Estática)
TPM	Total Productive Maintenance (Manutenção Produtiva Total)
USB	Universal Serial Bus (Barramento Serial Universal)
V	Volts (Tensão ou Diferença de Potencial)
VVC	Voltage Current Continuous (Tensão de Corrente Contínua)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
1.1	OBJETIVOS	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	MANUTENÇÃO	18
2.2	MÉTODOS BÁSICOS PARA GERENCIAMENTO DA MANUTENÇÃO	26
2.3	POLÍTICAS BÁSICAS DA MANUTENÇÃO	27
2.3.1	Manutenção corretiva.....	27
2.3.2	Manutenção preventiva	28
2.3.3	Manutenção preditiva.....	29
2.4	TRIBOLOGIA	30
2.4.1	Graxas lubrificantes.....	31
2.4.1.1	<i>Óleo base</i>	32
2.4.1.2	<i>Agente espessante.....</i>	32
2.4.1.3	<i>Aditivos</i>	33
2.4.1.4	<i>Dados tribológicos.....</i>	34
2.4.2	Lubrificação sólida.....	37
2.4.3	Óleos lubrificantes	37
2.4.3.1	<i>Viscosidade</i>	38
2.4.3.2	<i>Classificação de óleos lubrificantes</i>	40
2.4.3.2.1	<i>Classificação API.....</i>	40
2.4.3.2.2	<i>Classificação SAE</i>	41
2.4.3.2.3	<i>Classificação ISO.....</i>	42
2.4.3.3	<i>Aditivos em óleos lubrificantes</i>	43
2.5	DESGASTE	44
2.6	ANÁLISE DE ÓLEO LUBRIFICANTE	46
2.6.1	Ferrogramas analíticos	46
2.7	MAGNETISMO	49
2.7.1	Ímãs permanentes e temporários.....	52
2.7.2	Medidas magnéticas.....	52
2.7.3	Processo de fabricação dos ímãs permanentes	53
2.8	MOTORES ELÉTRICOS	54

3	MATERIAIS E MÉTODOS	56
3.1	PROJETO	56
3.1.1	Base de teste	57
3.1.2	Cúpula cônica	57
3.1.3	Suporte para conjunto motor elétrico-redutor	58
3.1.4	Copo base	58
3.1.5	Conjunto de fixação da lamínula	59
3.1.6	Chapa inferior de apoio	61
3.2	SELEÇÃO DE MATERIAIS	62
3.2.1	Poliamida	62
3.2.2	Aço	63
3.2.3	Bronze	64
3.3	COMPONENTES ELÉTRICOS - ELETRÔNICOS	65
3.3.1	Arduino	66
3.3.2	Teclado	68
3.3.3	Display	69
3.3.3.1	<i>Solda eletrônica</i>	70
3.3.3.2	<i>Funcionamento do display</i>	71
3.3.4	Seleção do conjunto motor elétrico redutor	71
3.3.5	Motor shield	72
3.3.5.1	<i>Programação</i>	73
3.3.6	Ligação elétrica	73
3.3.6.1	<i>Alojamento dos componentes elétricos e eletrônicos</i>	75
3.4	USINAGEM DE PEÇAS	76
3.4.1	Usinagem de peças poliméricas	76
3.4.2	Usinagem de peças metálicas	77
3.5	ÍMÃS UTILIZADOS PARA ENSAIOS	78
3.5.1	Combinações para ensaios	80
3.6	AMOSTRAS	83
3.7	METODOLOGIA DE TRABALHO	83
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	86
5	CONCLUSÕES	109
5.1	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	109

REFERÊNCIAS.....	111
APÊNDICE A - PROJETO.....	116
APÊNDICE B - CÁLCULOS REFERENTES.....	129
B.1 MOLAHELICOIDAL	129
B.2 CÁLCULO DE RESISTÊNCIA DA HASTE DE MOVIMENTAÇÃO	132
B.3 CÁLCULO DE RESISTÊNCIA DO CONJUNTO DE FIXAÇÃO	134
B.4 CÁLCULO DE RESISTÊNCIA DA HASTE DE FIXAÇÃO	135
B.5 CONJUNTO MOTOR ELÉTRICO-REDUTOR.....	137
APÊNDICE C - ALGORITMO DE PROGRAMAÇÃO DO ARDUINO	139
APÊNDICE D - TABELAS DE DEMOSNTRATIVOS DE CUSTOS	142
ANEXO A - PARTÍCULAS DE DESGASTE EM FERROGRAFIAS.....	146

1 INTRODUÇÃO

Estudos e pesquisas tentam alcançar a máxima eficiência energética em sistemas mecânicos para tentar reduzir custos. O atrito faz com que energia seja dissipada, em várias formas, geralmente em forma de calor, afetando assim, a eficiência de um sistema mecânico. Segundo Jost (1990), a tribologia é a ciência e tecnologia de superfícies interativas em movimento relativo e dos assuntos e práticas relacionados. Além disso, a tribologia envolve fundamentos da física, química, mecânica e materiais para prever o comportamento físico de sistemas mecânicos (SINATORA, 2005).

Toda superfície apresenta irregularidades denominadas de rugosidade. O grau de rugosidade afeta diretamente o atrito, que pode ser minimizado pelo uso de lubrificantes. Os lubrificantes são materiais que são colocados entre duas superfícies com objetivo de diminuir atrito e o desgaste entre essas superfícies. O tipo de lubrificante depende da necessidade de aplicação, podendo ser fluidos como o óleo, graxas ou em formas sólidas como grafite em pó. Além de reduzir o atrito e o desgaste, os lubrificantes podem controlar o calor, a contaminação, transferir energia e prevenir ataques químicos como corrosão (TROYER e FITCH, 2001).

De acordo com Lago (2007), a ferrografia é um artifício para se fazer estudos tribológicos em óleos lubrificantes. A ferrografia é uma técnica de manutenção preditiva que faz o monitoramento e diagnose de condições de máquinas, analisando e quantificando as partículas de desgaste de amostras de lubrificantes em serviço, sendo a ferrografia e analisadas através de um microscópio. Assim, pode-se determinar o desempenho do lubrificante, o tipo de desgaste, entre outros aspectos.

A ferrografia pode ser dividida em duas técnicas: ferrografia analítica e ferrografia quantitativa. A ferrografia quantitativa utiliza campos magnéticos para separar as partículas de desgaste do óleo lubrificante. O método da ferrografia quantitativa pode ser realizado através de separadores de partículas lineares ou através de separadores rotativos de partículas (RPD).

Os separadores rotativos de partículas são dispositivos que utilizam as forças gravitacional, centrífuga e magnética para confeccionar os ferrogramas. Esses dispositivos utilizam como princípio de funcionamento a força magnética exercida sobre o ferrograma através da densidade de fluxo magnético, por meio de ímãs permanentes com magnetização diametral.

O RPD comercial tem um alto custo de aquisição, o que motivou o objetivo deste trabalho, que foi o de projetar e construir um equipamento separador rotativo de partículas de baixo custo. Este equipamento deve fornecer ferrogramas de boa qualidade para estudos

tribológicos através de dispositivos que agregam funcionalidades ao equipamento. Além disso, um estudo minucioso foi realizado para verificar a viabilidade dos equipamentos similares existentes no mercado.

O presente trabalho está dividido em quatro partes. A primeira parte aborda a revisão da literatura sobre manutenção, tribologia e análise de lubrificantes. A segunda parte expõe os materiais e os métodos utilizados para a confecção do protótipo. A terceira parte refere-se os resultados e discussões dos ferrogramas obtidos pelo protótipo desenvolvido. Já a quarta parte refere-se a conclusão do trabalho.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é projetar e confeccionar um protótipo separador rotativo de partículas (RPD) de baixo custo.

Os objetivos específicos deste trabalho consistem de:

- Pesquisar os equipamentos similares existentes no mercado.
- Realizar pesquisas no meio científico sobre os princípios teóricos do funcionamento do equipamento.
- Baseado nos princípios teóricos, projetar e construir um equipamento com menor custo e mesma funcionalidade.
- Utilizar componentes eletrônicos controlados através de um microcontrolador utilizado para confecção do modelo RPD de baixo custo.
- Obter e analisar ferrogramas de boa qualidade semelhante ao do modelo RPD encontrado no mercado.
- Através do microcontrolador buscar aumentar e aperfeiçoar a funcionalidade do equipamento.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste item apresenta-se a revisão da literatura sobre manutenção, abordando definições, histórico, custos, métodos básicos para gerenciamento da manutenção e políticas básicas da manutenção.

É feita também abordagem sobre tribologia, enfocando os tipos de lubrificantes, características fundamentais e aplicações. E, por fim, são abordados os tipos de desgaste e máquinas para análise de lubrificantes.

2.1 MANUTENÇÃO

Manutenção pode ser definida como o conjunto de cuidados técnicos para o funcionamento regular e permanente de máquinas, equipamentos, ferramentas, e instalações, sendo que estes cuidados técnicos têm o intuito de correlacionar conservação, adequação, restauração, substituição e prevenção de máquinas e equipamentos (MOUBRAY, 1997). De acordo com ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) NBR 5462/1994, a manutenção é a associação de ações técnicas, administrativas e de supervisão, afim de preservar e/ou repor componentes de máquinas e equipamentos para desempenhar a função designada.

De acordo com Moubray (1997), a manutenção começou a evoluir a partir da década de 1930 e são divididas em três gerações. A primeira geração da manutenção compreende um período até a Segunda Guerra Mundial, a segunda geração da manutenção abrange após a Segunda Guerra Mundial até a metade da década de 1970, a terceira geração até nos tempos atuais.

Antes da Segunda Guerra Mundial a demanda de produtos industrializados era baixa e as plantas industriais eram pouco mecanizadas, máquinas e equipamentos eram simples e superdimensionados, para se tornar confiável e de fácil reparo, assim as tarefas de manutenção eram limpeza, lubrificação e reparos corretivos após a quebra. O tempo que máquinas e equipamentos ficavam ociosos devido a quebra, não era de alta prioridade na maioria dos gestores. A primeira geração da manutenção ficou marcada pelos reparos corretivos após a falha e uma visão errônea de que os equipamentos se desgastavam pela idade de trabalho e, com isso, quebravam (KARDEC; NASCIF, 2001; MOUBRAY, 1997).

Devido à guerra, houve grande demanda de produtos industrializados e simultaneamente houve diminuição da mão-de-obra disponível, contribuindo para uma forte mecanização industrial. Após a guerra, ainda com a alta demanda de produtos industrializados, o tempo ocioso de máquinas e equipamentos devido às quebras e falhas era elevado, assim

acarretou a percepção de que as quebras e falhas das máquinas e dos equipamentos poderiam ser prevenidas, surgindo o conceito de manutenção preventiva. Este conceito expõe a idéia de que as revisões em máquinas e equipamentos deveriam ser realizadas em intervalos fixos, desse modo os custos de manutenção começaram a se elevar em relação aos custos operacionais, assim foi necessário instaurar sistemas de planejamento e controle de manutenção para a redução dos custos gerados pela manutenção (KARDEC; NASCIF, 2001).

A segunda geração da manutenção é marcada pelas revisões regulares, provocando, conseqüentemente, aumento da vida útil de máquinas e equipamentos, sistemas de planejamento e controle de manutenção, introdução de computadores para auxílio do planejamento e controle de manutenção.

Na segunda metade da década de 1970, devido ao crescimento da automação e da mecanização industrial as máquinas e os equipamentos ficaram mais suscetíveis a falhas, com isso a interrupção da produção era comum, havendo como consequência, a diminuição da produção, aumentando os custos de produção. Assim, as indústrias tiveram que recorrer a pesquisas e novas técnicas de manutenção para aumentar a confiabilidade e disponibilidade de máquinas e equipamentos (MOUBRAY, 1997).

A terceira geração da manutenção é destacada pela confiabilidade devido às ações preditivas, maior disponibilidade de máquinas e equipamentos e, conseqüentemente, prolongamento da vida útil dos mesmos e aumento da qualidade dos produtos. Houve grande evolução nas técnicas de manutenção como monitoramento, análise de falhas e defeitos; projetos voltados para o aumento da confiabilidade; diminuição das manutenções corretivas não planejadas e preventivas (KARDEC; NASCIF, 2001; MOUBRAY, 1997).

A partir da segunda metade da década de 1990 até os tempos atuais, encontra-se a quarta geração. Essa geração tem como característica a disponibilidade, confiabilidade e manutenibilidade, assim, como foco de novos projetos industriais, há também fortes estudos sobre análise e monitoramento de falhas com intuito de otimizar a performance de máquinas e equipamentos, reduzindo falhas prematuras e falhas de mortalidade infantil. Há uma atenuação da manutenção preditiva e a manutenção corretiva se torna como ineficiência de todo sistema de manutenção, assim há uma forte redução na interferência da manutenção na planta.

Outra característica interessante da quarta geração, de acordo com Kardec e Nascif (2001), é a terceirização da manutenção. Estudos recentes mostram que isso vem apresentando ótimos indicadores. Devido à alta diversidade de máquinas e equipamentos que se encontram em uma planta industrial, é muito árdua a gestão da manutenção. A terceirização da manutenção apresenta como vantagem a redução de custos devido à redução do estoque (geralmente se

contrata com o fornecimento do material para a manutenção), redução de áreas ocupadas pela equipe de manutenção, redução do desperdício, otimização do tempo da administração entre outros.

Quando não há uma visão estratégica da terceirização da manutenção podem ocorrer problemas como aumento da dependência de terceiros, declínio da qualidade, redução da mão-de-obra especializada, entre outros (KARDEC; NASCIF, 2001).

O Quadro 1 demonstra a evolução da manutenção, com as respectivas expectativas da manutenção, visões de falhas e principais técnicas de manutenção de cada geração.

Quadro 1 - Evolução da Manutenção.

EVOLUÇÃO DA MANUTENÇÃO				
	Primeira Geração	Segunda Geração	Terceira Geração	Quarta Geração
ANO	1930 - 1945	1945 - 1975	1975 - 1995	1995 - Atual
Aumento das expectativas em relação à Manutenção	Concerto após a falha.	Disponibilidade crescente; Maior vida útil do equipamento.	Maior confiabilidade; Maior disponibilidade; Melhor relação custo-benefício; Preservação do meio ambiente.	Maior confiabilidade; Maior disponibilidade; Preservação do meio ambiente; Segurança; Influir nos resultados do negócio; Gerenciar os ativos.
Visão quanto à falha do equipamento	Todos os equipamentos se desgastam com a idade e, por isso, falham.	Todos os equipamentos se comportam de acordo com a curva da banheira.	Existência de padrões de falhas.	Reduzir drasticamente falhas prematuras dos padrões A e F.
Mudança nas técnicas de Manutenção	Habilidades voltadas para o reparo	Planejamento manual da manutenção; Computadores grandes e lentos; Manutenção Preventiva (por tempo).	Monitoramento da condição; Manutenção preditiva; Análise de risco; Computadores pequenos e rápidos; Softwares potentes; Grupos de trabalho multidisciplinares; Projetos voltados para a confiabilidade; Contratação por mão de obra e serviço.	Aumento da Manutenção Preditiva e Monitoramento da Condição; Minimização nas Manutenções Preventiva e Corretiva não Planejada; Análise de Falhas; Técnicas de confiabilidade; Manutenibilidade; Engenharia de Manutenção; Projetos voltados para confiabilidade, manutenibilidade e Custo do Ciclo de Vida; Contratação por resultados.

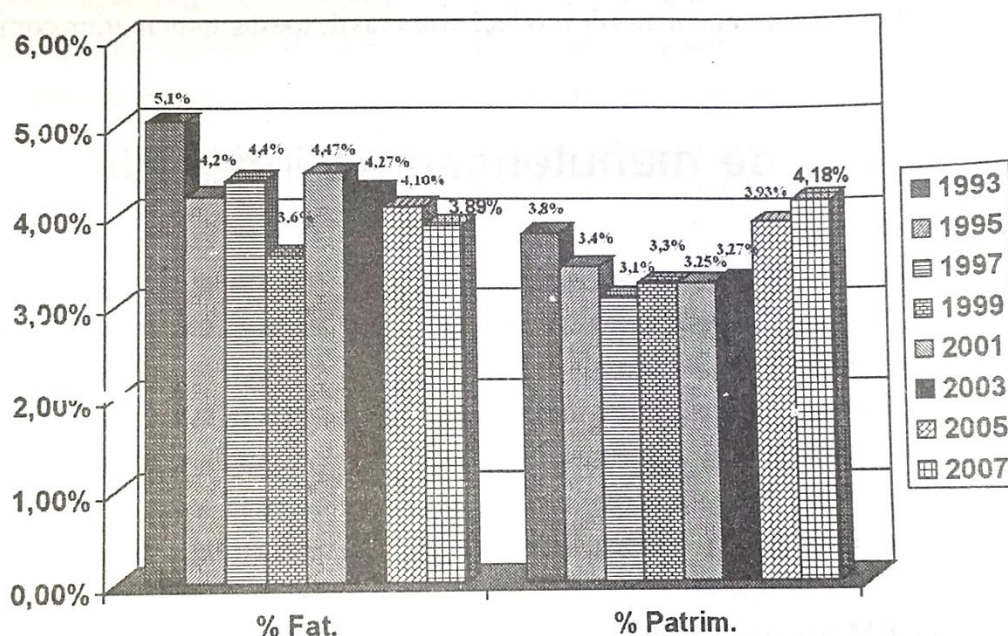
Fonte: Kardec e Nascif (2001).

A manutenção é fator econômico crucial para as indústrias, pois se deve levar em consideração os custos da interferência na produção e de perdas no processo, os recursos humanos e material. Custos fabris são baseados na quantidade de tempo que é gasto para

processar o produto, se o maquinário e/ou equipamento não estiver em plenas condições de funcionamento haverá interrupção no processo produtivo, assim, provocando prejuízos. Antigamente gerentes de empresas tinham uma visão errônea sobre a manutenção, pois presumiam que era um custo difícil de controlar e muito alto, que agregava muito ao valor do produto, tornando assim o produto menos competitivo (VIANA, 2002).

De acordo com Branco Filho (2008), os indicadores mais utilizados para estimar o custo da manutenção em âmbito empresarial é o custo da manutenção em relação ao faturamento, e o custo da manutenção em relação ao patrimônio. A Figura 1 demonstra a estimativa do custo da manutenção em âmbito empresarial.

Figura 1 - Custos de manutenção em relação ao faturamento e ao patrimônio.



Fonte: Abraman (2007).

Como se pode verificar, de acordo com Documento Nacional entre os anos de 1997 a 2007, o custo da manutenção em relação ao patrimônio teve um aumento expressivo, por conta de investimentos feitos nesta área. Já o custo da manutenção em relação ao faturamento, teve um declínio a partir do ano 2001 a 2007, um reflexo da quarta geração sobre a confiabilidade de máquinas e equipamentos para a redução de custos.

Kardec e Nascif (2001), classificam os custos de manutenção em três grandes grupos:

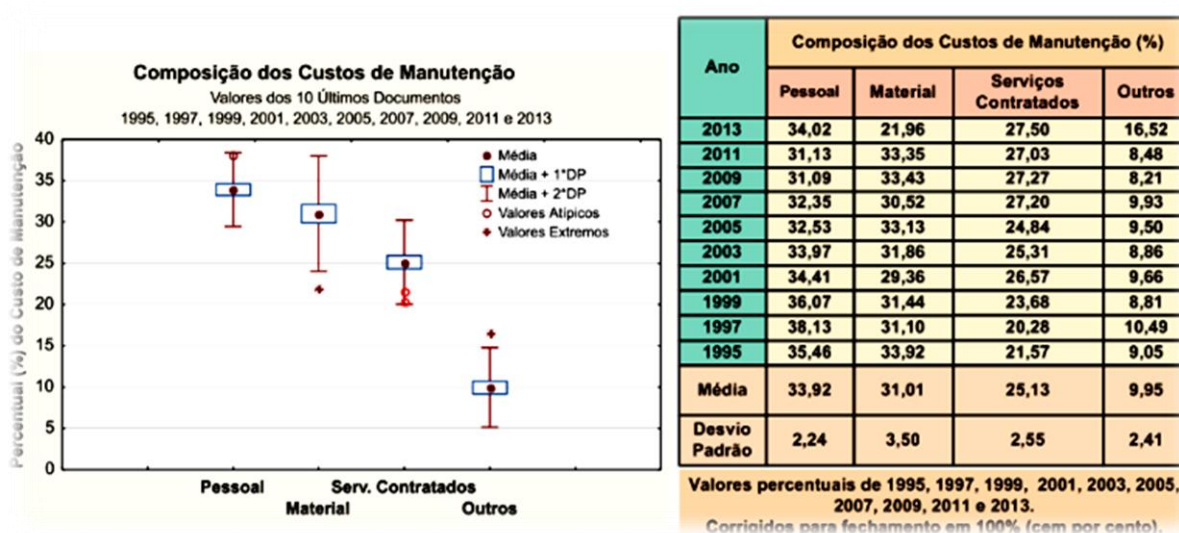
- custos de perda de produção: são custos de perda de produção decorrentes pela falha do equipamento principal sem que o equipamento reserva (quando houver)

esteja prontamente disponível para substituição, e falha do equipamento devido à intervenção imprópria da manutenção;

- custos diretos: são custos necessários para deixar os equipamentos em operação, enquadrando a manutenção corretiva, preventiva e preditiva. Tem como constituintes os custos de mão-de-obra direta, custos de materiais e custos de serviços de terceiros;
- custos indiretos: são custos oriundos da estrutura gerencial, análise e estudos para melhorias, compra de instrumentos e de ferramentas para realização da manutenção.

A Figura 2 demonstra claramente os custos diretos de manutenção.

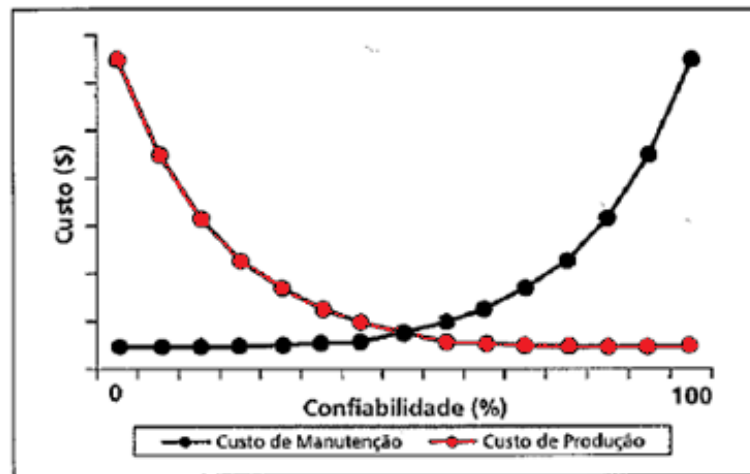
Figura 2 - Composição dos custos de manutenção.



Fonte: Abraman (2015).

Atualmente a redução de custos tem como pilares associados a confiabilidade, a disponibilidade e manutenibilidade de máquinas e ferramentas.

Conforme a NBR 5462/1994 a confiabilidade pode ser definida como "capacidade de um item desempenhar uma função requerida sob condições especificadas, durante um dado intervalo de tempo". Segundo Kardec e Nascif (2001), quanto maior for a confiabilidade de uma máquina ou equipamento menor serão os custos de produção, porém maior será o custo da manutenção. A Figura 3 mostra relação do custo de manutenção e de produção em relação à confiabilidade.

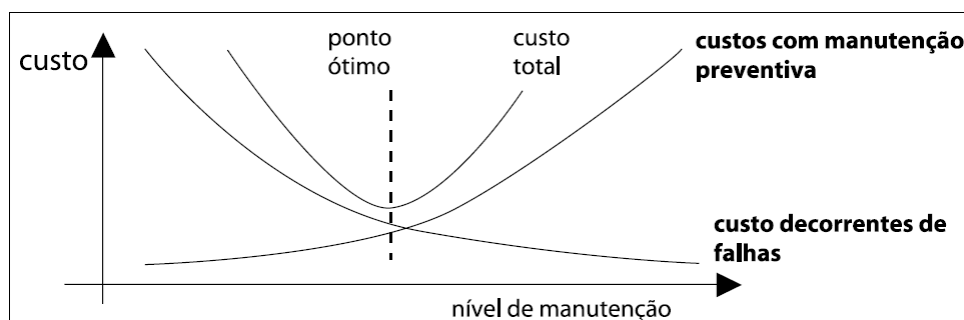
Figura 3 - Confiabilidade x Custos.

Fonte: Kardec e Nascif (2001).

A confiabilidade está centrada em falhas (interrupção da função designada), quanto menor o número de falhas maior será a confiabilidade. Kardec e Nascif (2001) citam os três períodos de falhas.

- Mortalidade infantil: são falhas ocasionadas devido a falhas de projetos, defeitos de fabricação, ou até mesmo problemas na instalação de equipamentos.
- Vida útil: há uma enorme dificuldade de se prever esse tipo de falha que é decorrente de fatores de difícil controle como, por exemplo, fadiga entre outros.
- Envelhecimento ou degradação: há um crescimento no índice de falha devido ao desgaste natural do equipamento com o passar do tempo.

Murty e Naikan (1995) apresentam um modelo matemático para a determinação do ponto ótimo. A Figura 4 demonstra o gráfico do custo em relação ao nível de manutenção.

Figura 4 - Custos x Nível de Manutenção.

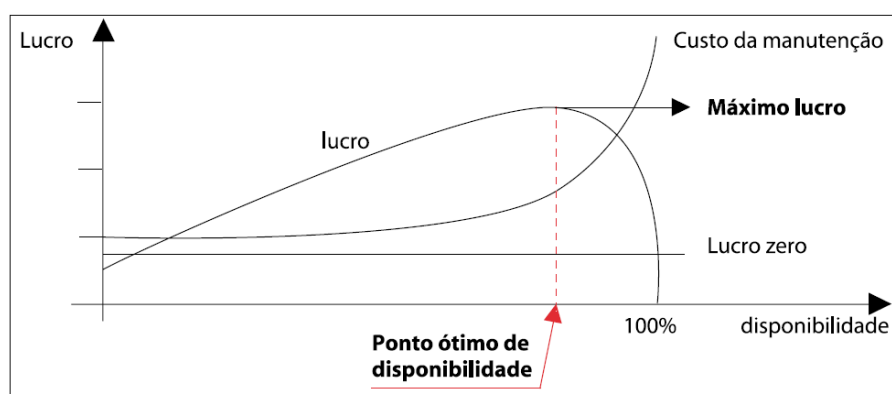
Fonte: Murty e Naikan (1995).

A Figura 4 ilustra que o custo total de manutenção é a soma dos custos de manutenção preventiva e os custos de falha. Com aumentos graduais em investimentos em manutenção preventiva diminui-se os custos de falhas, reduzindo, portanto, o custo da manutenção. Porém, investimentos de manutenção acima do ponto ótimo amplia o custo total, sem que diminua a redução dos custos de falhas.

Disponibilidade é a propensão de certo item de estar em condições para desempenhar a função atribuída dentro de um instante ou intervalo de tempo estipulado (NBR 5462, 1994). Dentro da disponibilidade, tem-se a disponibilidade inerente que leva em consideração somente o tempo de reparo, já a disponibilidade operacional (o que realmente importa para a empresa) leva em consideração além do tempo de reparo, o tempo de deslocamento, o tempo de logística entre outros (KARDEC; NASCIF, 2001).

Mirshawka e Olmedo (1993) apresentam um modelo matemático para a determinação do ponto ótimo de disponibilidade. A Figura 5 demonstra o gráfico do ponto ótimo de disponibilidade em relação ao lucro e a disponibilidade.

Figura 5 - Lucro x Disponibilidade.



Fonte: Mirshawka e Olmedo (1993).

A Figura 5 ilustra que o ponto ótimo de operação promove o lucro máximo de operação, e que 100% da disponibilidade (não há falhas), acarreta gastos elevados com a manutenção, diminuindo assim, o lucro da empresa.

Resumindo, a manutenibilidade é o grau de facilidade de manutenção de uma máquina ou equipamento. Monchy (1989) faz definição clara sobre a manutenibilidade: "É a probabilidade de restabelecer a um sistema suas condições de funcionamento específicas, em limites de tempos desejados, quando a manutenção é conseguida nas condições e com meios prescritos".

2.2 MÉTODOS BÁSICOS PARA GERENCIAMENTO DA MANUTENÇÃO

Como mencionado anteriormente, a partir da terceira geração da manutenção, houve crescimento da automação e da mecanização industrial, afim de otimizar o tempo e, como consequência, uma determinada padronização dos produtos. A padronização de produtos acarreta uma qualidade que é obtida através do perfeito funcionamento de máquinas e equipamentos que são usados para sua fabricação. Segundo Kardec e Nascif (2001), um bom sistema de gerenciamento da manutenção é primordial para gestão de qualidade, como a Norma ISO 9001, contribuindo para a competitividade da empresa.

Os objetivos da qualidade são alcançados através do gerenciamento da manutenção, como o programa 5S, RCM, TPM ou Multiespecialização ou Manutenção Autônoma.

O 5S é uma ferramenta de gestão de manutenção japonesa que trata de organização (Seiri), ordem (Seiton), limpeza (Seiso), asseio (Seiketsu) e disciplina (Shitsuke). É uma estratégia para busca melhoria ao ambiente de trabalho, melhoria da produtividade, melhoria da qualidade e redução de custos (KARDEC; NASCIF, 2001).

Moubray (1997) define que a manutenção centrada na confiabilidade (RCM) é “um processo usado para determinar o que deve ser feito para assegurar que qualquer ativo físico continue a fazer o que seus usuários querem que ele faça no seu contexto operacional”, portanto, o RCM aborda que a manutenção é feita através de um estudo de confiabilidade sobre o equipamento.

A manutenção produtiva total (TPM) é uma filosofia de trabalho japonês que visa manutenção da produtividade, assim, eliminando perdas, paradas e custos, não conflitando com nenhum sistema de manutenção. Tem como pilares a melhoria focada, manutenção autônoma, manutenção planejada, educação e treinamento, controle inicial, manutenção da qualidade, TPM office e segurança (FLEMING; FRANÇA, 1997).

Nos pilares da TPM a melhoria focada tem objetivo de reduzir os problemas e melhorar o desempenho (por exemplo: reduzir a vibração para aumento da vida útil). A manutenção autônoma é o autogerenciamento, controle e conscientização da TPM. Manutenção planejada são técnicas de planejamento e controle. Educação e treinamento são as capacitações constantes de todos os funcionários da empresa. Controle inicial é a implantação de sistemas de monitoramento para eliminar falhas iniciais de máquinas e equipamentos. Manutenção de qualidade são programas instaurados nas empresas que têm taxa zero de falhas. TPM office é a instauração da TPM nas áreas administrativas, afim de aumentar a eficiência no setor e,

consequentemente, em toda empresa. Segurança é instauração de uma política de saúde, segurança e preservação do meio ambiente (KARDEC; NASCIF, 2001).

A multiespecialização ou manutenção autônoma são manutenções realizadas pelos próprios operadores de máquinas e equipamentos, sendo uma ferramenta muito útil, eficaz e de baixo custo na manutenção preventiva (TAKAHASHI, 1993).

2.3 POLÍTICAS BÁSICAS DA MANUTENÇÃO

Há inúmeras políticas que fazem intervenções para manutenção de máquinas e equipamentos que se subdividem em dois grandes grupos, intervenção para manutenção não planejada e a intervenção para manutenção planejada. A intervenção para manutenção não planejada se dá pela manutenção corretiva. Já a intervenção para manutenção planejada é subdividida em manutenção preditiva e preventiva (KARDEC; NASCIF, 2001).

2.3.1 Manutenção corretiva

A manutenção corretiva é realizada quando um equipamento sofre uma pane ou avaria, e o serviço de manutenção deverá recolocar o equipamento ou máquina em funcionamento para executar a sua função requerida. A realização do serviço da manutenção corretiva gera altos custos, pois são ações emergenciais não previstas, podendo estar associadas pela indisponibilidade de mão de obra, peças ou serviços havendo, como consequência, a interrupção na produção (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT, 1994).

Dhillon (2002) apresenta as etapas sequenciais de manutenção corretiva que são reconhecimento de culpa, localização, diagnóstico reparação e por fim o check-out. Ele também apresenta cinco categorias de manutenção corretiva.

- *Fail-repair*: nesta ação corretiva o elemento danificado não é restaurado.
- *Salvage*, este tipo de ação visa substituição de peças danificadas por peças reconcondicionadas.
- *Rebuild*, este tipo de ação corretiva dedica a colocar o componente a ser substituído em uma condição mais próxima possível da sua condição funcionamento e durabilidade.
- *Overhaul*, tem como objetivo restaurar um componente, através de padrões de operação.

- *Servicing*, uma ação corretiva poderá desencadear outras ações corretivas, devido ao tipo de trabalho a ser realizado ou sistema da máquina/equipamento.

Kardec e Nascif (2001), classifica a manutenção corretiva em duas classes:

- Manutenção corretiva não planejada, o reparo da falha é de forma aleatória (quebras de componentes aleatórios);
- Manutenção corretiva planejada, o reparo é realizado quando o equipamento apresenta desempenho abaixo do padrão, assim essa falha só é corrigida através da decisão gerencial.

2.3.2 Manutenção preventiva

Segundo Viana (2002), a manutenção preventiva são todas as ações realizadas em máquinas ou equipamentos que não estejam danificados, dentro de intervalos programados, afim de diminuir a possibilidade de falhas e degradações, assim evitando paradas operacionais não planejadas.

Dhillon (2002) apresenta sete elementos da manutenção preventiva.

- *Inspection* é a inspeção periódica de materiais ou componentes afim de verificar o funcionamento adequado.
- *Servicing* que se trata dos itens que se deve trocar periodicamente para a preservação para evitar possíveis falhas, como limpeza, lubrificação e carregamento de componentes.
- *Calibration* visa a comparação das características dos componentes através de um padrão, pode ser feita por um instrumento, afim de verificar incompatibilidade de um valor padrão ou parâmetro.
- *Testing* é a verificação periódica de componentes elétricos e mecânicos para detectar possíveis degradações.
- *Alignment* são alterações específicas nos componentes para obter operação ideal de funcionamento.
- *Ajustment* é o ajuste periódico de elementos variáveis.
- *Installation* é a substituição periódica de itens que tenham tempo ou desgaste limitado, para manter as tolerâncias.

A manutenção preventiva apresenta como vantagem um número maior de equipamentos disponíveis e uma diminuição na espera do equipamento, regularidade na qualidade do serviço, procedimentos padronizados, assim, um aumento de segurança, redução de estoque de peças e redução de tempo e custo. Por outro lado, a manutenção preventiva apresenta como desvantagem possíveis danos aos componentes, falha em componentes novos, uso de componentes em maior escala e falha humana (DHILLON, 2002).

2.3.3 Manutenção preditiva

De acordo com Viana (2002) e Dhillon (2002), a manutenção preditiva é um conjunto de ações e técnicas que monitoram máquinas, equipamentos e componentes, buscando estipular o tempo correto para intervenção do serviço de manutenção, aproveitando ao máximo a vida útil do componente, assim, reduzindo ao máximo a manutenção preventiva e corretiva.

Kardec e Nascif (2001) mencionam que "através de técnicas preditivas é feito o monitoramento da condição e ação de correção, quando necessária, é realizada através de uma manutenção corretiva planejada".

A manutenção preditiva tem como foco a disponibilidade, pois análises são realizadas com o equipamento em plena operação, e a intervenção de ações corretivas só é realizada quando está próxima ao limite do grau de deterioração (KARDEC; NASCIF, 2001).

Kardec e Nascif (2001) apresentam elementos fundamentais para se aderir à manutenção preditiva:

- a instalação e o equipamento devem permitir o monitoramento e as devidas medições;
- deve-se analisar se o custo envolvido em manutenção preditiva em certas máquinas ou equipamentos são compensatórios;
- a origem das falhas devem ser monitoradas e sua ascensão acompanhadas;
- estabelecer programas sistematizados de acompanhamento, análise e diagnóstico de falhas.

Existem inúmeras técnicas utilizadas para manutenção preditiva, mas as mais utilizadas são: análise de vibração mecânica, termografia, ultrassom e análise de óleos lubrificantes.

A vibração mecânica em um componente ou ponto em uma máquina pode disseminar em vários outros pontos, provocando desgastes e fadigas em vários componentes

correlacionados. A técnica de análise de vibração tem como objetivo detectar a origem da vibração para se realizar procedimentos corretos e eliminar o problema (ARATO JUNIOR, 2004).

A termografia é uma técnica que utiliza aparelhos que permitem a averiguação e controle de temperaturas em superfícies através da radiação infravermelha (ARATO JUNIOR, 2004).

A técnica de ultrassom tem como objetivo verificar e detectar discontinuidades e defeitos internos de peças. Tem como vantagem detectar pequenos defeitos internos, porém exige profundos conhecimentos e experiência do operador para executar o procedimento e fazer o laudo (ARATO JUNIOR, 2004).

Já a parte de análise de lubrificantes tem como objetivo determinar o momento adequado para a troca do lubrificante e verificar o desgaste de componentes, através da análise de viscosidade e de partículas sólidas (ferrosas e não ferrosas) presentes no lubrificante. Essa técnica tem como desvantagem a necessidade de um grande número de equipamentos laboratoriais. Além da análise do lubrificante, a manutenção preditiva tem o objetivo de otimizar o intervalo entre trocas do lubrificante (DHILLON, 2002; ARATO JUNIOR, 2004).

2.4 TRIBOLOGIA

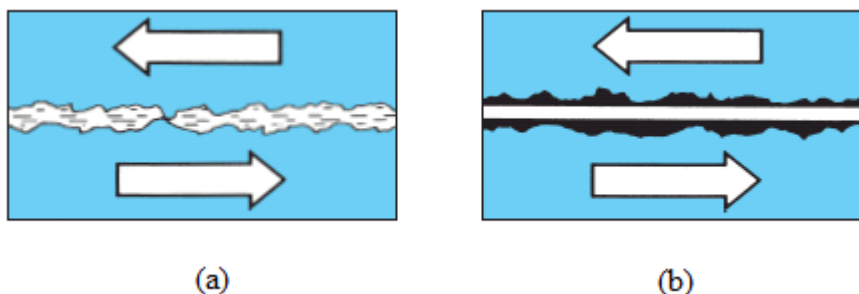
Estudos e pesquisas tentam alcançar a máxima eficiência energética em sistemas mecânicos para tentar reduzir custos. O atrito faz com que energia seja dissipada, em várias formas, geralmente em forma de calor, afetando assim, a eficiência de um sistema mecânico.

Segundo Jost (1990), a tribologia é a ciência e tecnologia de superfícies interativas em movimento relativo e dos assuntos e práticas relacionados. Nas últimas décadas estudos tribológicos ganharam grande importância, a fim de obter o menor atrito. Além disso, a tribologia envolve fundamentos da física, química, mecânica e materiais para prever o comportamento físico de sistemas mecânicos (SINATORA, 2005).

Toda superfície apresenta irregularidades denominadas de rugosidade, como pode ser visto na Figura 6 (a). O grau de rugosidade afeta diretamente o atrito, que pode ser minimizado pelo uso de lubrificantes. Os lubrificantes são materiais que são dispostos entre duas superfícies com objetivo de produzir uma espécie de filme, preenchendo espaços irregulares superficiais, afim de diminuir atrito e o desgaste entre essas superfícies interativas, conforme a Figura 6 (b). O tipo de lubrificante depende da necessidade de aplicação, podendo ser semifluidos como graxas, em formas sólidas como grafite em pó ou fluidos como o óleo. Além de reduzir o atrito

e o desgaste, os lubrificantes podem controlar o calor, a contaminação, transferir energia e prevenir ataques químicos como corrosão (TROYER; FITCH, 2001).

Figura 6 - Rugosidade e atrito.



Fonte: Liqui Moly (2015).

2.4.1 Graxas lubrificantes

Mang e Dresel (2007) afirmam que não é fácil definir graxas como sólidos ou líquidos, portanto são definidos como sólidos para produtos semifluidos de dispersão de um agente espessante em um lubrificante líquido.

Graxas lubrificantes são utilizadas quando óleos lubrificantes não são eficazes, tendo em vista que tendem a escoar, devido à baixa viscosidade em relação às graxas. São utilizadas em vários elementos de máquinas e componentes como: válvulas, correntes, engrenagens, conexão de roscas, parafusos, rolamentos, entre outros.

Assim, as graxas devem atender vários atributos importantes como: longa vida útil de trabalho em altas temperaturas, prevenção contra oxidação e corrosão, confiabilidade em baixa temperatura de *start-up* de equipamentos, resistência à água e conformidade entre padrões impostos a indústria (BLOCH, 2009).

As graxas lubrificantes apresentam vantagens em relação aos óleos lubrificantes como: escoam somente onde há influência da força aplicada, boa aderência a superfícies, maior resistência à água, atuam como selos contra sujeira e contaminação, a viscosidade de graxas tem menor dependência da temperatura, melhor desempenho sob condições de filme de aperto (BLOCH, 2009; MANG; DRESEL, 2007).

Porém, as graxas lubrificantes apresentam um limite de velocidade mais baixo em relação aos óleos devido ao fato de ter maior viscosidade, não são recomendados onde a transferência de calor é um problema pois não dissipam calor, são mais suscetíveis à oxidação

em relação aos óleos lubrificantes, também não têm capacidade de remover partículas de desgaste do ponto de atrito (BLOCH, 2009; MANG; DRESEL, 2007).

Graxas lubrificantes apresentam pseudoplasticidade, ou seja, a viscosidade é reduzida com o aumento da força cisalhante aplicada, conferindo, assim, a penetração e a lubrificação de componentes e elementos (MANG; DRESEL, 2007). Graxas lubrificantes são compostos basicamente de óleo lubrificante, agente espessante e aditivos para conferir propriedades específicas (BLOCH, 2009).

2.4.1.1 Óleo base

Geralmente são utilizados como óleo base para graxas, óleos com viscosidade cinemática entre 15 a 1500 $mm^2.s^{-1}$ a 40 °C. Óleos de baixa viscosidade são utilizados onde há baixa temperatura de trabalho e altas velocidades. Enquanto óleos de alta viscosidade são utilizados onde há menores velocidades, altas cargas, resistência à perda de evaporação, resistência a solventes e à água, entre outros. As graxas podem ser feitas a partir de óleos minerais ou de base sintética (MANG; DRESEL, 2007).

2.4.1.2 Agente espessante

O agente espessante altera propriedades do lubrificante líquido, conferindo a consistência, basicamente é um tipo de sabão. Cada tipo de sabão detém uma propriedade característica de aplicação (MANG; DRESEL, 2007). Os sabões mais utilizados são à base de lítio, sódio, cálcio, bário e alumínio (SÁNCHEZ et al., 2011).

O espessamento é obtido através dos ácidos carboxílicos (contém 18 átomos de carbono) presente em sabões. Os sabões são geralmente feitos a partir de um ácido denominado de hidroxisteárico 12, ou também a partir de combinações de éster, glicerídeos e hidróxido de elementos de metais alcalinos e alcalino-terroso (MANG; DRESEL, 2007).

Quanto maior for o comprimento da cadeia de carbono de um ácido carboxílico de um sabão, maior será a solubilidade do óleo base, conferindo assim uma menor capacidade de espessamento e menor ponto de gotejamento (MANG; DRESEL, 2007).

A Tabela 1 demonstra o impacto de diferentes tipos de espessante nas propriedades das graxas.

Tabela 1 - Impacto do espessante nas propriedades das graxas.

Espessante	Faixa de temperatura de serviço (°C)		Ponto de gota DIN ISO 2176 (°C)	Resistência à água	Estabilidade e à alta pressão	Aplicação preferida
	Óleo Mineral	Óleo Sintético				
Alumínio	-20 à 70	-	120	bom	satisfaz	Engrenagens, válvulas.
Cálcio	-30 à 50	-	100	muito bom	bom	Vedantes de labirinto sob impacto da água.
Lítio	-35 à 120	-60 à 160	170/200	bom	satisfaz	Mancais de deslizamento, contatos.
Sódio	-30 à 100	-	150/170	insatisfaz	satisfaz	Engrenagens.
Al complexo	-30 à 140	-60 à 160	> 230	bom	satisfaz	Mancais e rolamentos lisos, pequenas engrenagens.
Ba complexo	-25 à 140	-60 à 160	> 220	muito bom	muito bom	Mancais e rolamentos lisos, válvulas, misto de fricção.
Ca complexo	-30 à 140	-60 à 160	> 190	muito bom	muito bom	Mancais de deslizamento, selos de alta velocidade.
Li complexo	-40 à 140	-60 à 160	> 220	bom	satisfaz	Mancais de deslizamento, acoplamentos.
Na complexo	-30 à 140	-60 à 160	> 220	satisfaz	satisfaz	Mancais de deslizamento (sujeito a vibração).
Bentonita	-40 à 140	-60 à 180	nenhum	bom	satisfaz	Válvulas (base de silicone para alto vácuo), engrenagens, contatos.
Poliuréia	-30 à 160	-40 à 180	nenhum	bom	satisfaz	Mancais de deslizamento.
PTFE	-	-40 à 260	250	bom	bom	Mancais de deslizamento, válvulas sujeitos a meios agressivos.

Fonte: Bloch (2009).

Normalmente a graxa lubrificante é composta em sua formulação entorno de 90% de óleo, o restante está dividido entre sabão e aditivos (CARRETEIRO; BELMIRO, 2006).

2.4.1.3 Aditivos

Muitos aditivos utilizados em lubrificantes líquidos também podem ser utilizados em graxas, podendo apresentar altas concentrações em sua composição, sendo interagidos com o agente espessante. Essa interação entre aditivos e espessante deve ser sempre bem observada, pois aditivos podem modificar as partículas de união entre óleo e espessante (MARTÍN-ALFONSO et al., 2011).

Os aditivos mais comuns são antioxidantes, inibidores de corrosão, aditivos de extrema pressão/antidesgaste, lubrificantes sólidos, desativadores de metal (inibição de efeitos catalíticos) e aderentes (MANG; DRESEL, 2007).

2.4.1.4 Dados tribológicos

Graxas lubrificantes são caracterizadas através de normas tribotécnicas, que são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Características de normas tribotécnicas.

Características	Teste	Notas
Óleo Base/ Espessante		Ambas as matérias-primas fornecem informações sobre o comportamento possível de uma graxa lubrificante. No entanto, apenas as propriedades químico-físicas e mecânico-dinâmico são característicos do desempenho real da graxa.
Densidade	DIN 51 757	A quantidade de lubrificante necessário para um certo atrito é geralmente indicada em volume. O volume em mm ³ multiplicado pela densidade é igual à quantidade de lubrificante requerido para o ponto de fricção.
Viscosidade de óleo base	DIN 51 561	Óleos de base de espessura ≤ 46 mm/s são os preferidos para velocidades altas, cargas e baixa rugosidade da superfície. Óleos-base de espessura - 220 mm/s são preferidos para baixas velocidades, cargas elevadas e/ou aumento da rugosidade da superfície.
Coloração		A cor não é uma característica de desempenho. É determinada pelas matérias-primas e aditivos. Graxas de grafite e MoS ₂ , por exemplo, são pretos.
Ponto de gota	DIN ISO 2176	Mesmo que o ponto de gota não seja indicativo da temperatura de serviço, deve ser, pelo menos, 40 ° C acima do limite.
Faixa de temperatura de serviço		Um intervalo de lubrificação adequado pode ser alcançado na gama especificada. Temperaturas de serviço são indicadas, com base em medições e procedimento de teste como uma experiência prática.
Fator velocidade (n*dm)		O fator de velocidade é importante para graxas de lubrificação utilizadas em mancais de deslizamento. Ele leva em consideração o atrito interno da combinação base de óleo/espessante. Se à graxa lubrificante usada em outro campo de aplicação tenha sido atribuído um determinado fator de velocidade, também é adequado a mancais de deslizamento.
Penetração de trabalho	DIN ISO 2137	Medir a penetração trabalho fornece informação sobre a consistência da graxa, ou seja, se é macio ou duro.
Consistência	DIN 51 828	A classificação de graxas em graus NLGI é uma classificação simplificada em termos de trabalho de penetração.

Características	Teste	Notas
Viscosidade aparente		A viscosidade aparente (medida em mPa*s) é o mesmo que o atrito interno do lubrificante. Kluber classificou a viscosidade aparente em 5 classes. A Classe EL (extra leve) caracteriza uma graxa de bom funcionamento, adequado para aplicações com torques extremamente baixo.

Fonte: Bloch (2009).

A viscosidade e a consistência de graxas lubrificantes são elementos importantes para a seleção adequada para devida aplicação. A Tabela 3 demonstra os graus de liberdade, enquanto a Tabela 4 demonstra as classes de consistência.

Tabela 3 - Graus de viscosidade.

Graus de Viscosidade		
Classe de viscosidade	Viscosidade aparente (mPa*s)	Explicação
EL	≤ 2000	Graxa lubrificante extra-leve para torques extremamente baixos, funcionamento suave.
L	2000... 4000	Graxa lubrificante leve para torques baixos ou altas velocidades em rolamentos, graxa de alta velocidade.
M	4000... 8000	Graxa lubrificante meio de requerimentos padrão em todos os pontos de graxa lubrificante.
S	8000... 20000	Graxa lubrificante pesado para cargas elevadas ou fluidos, de alta pressão ou graxas de vedação.
ES	≥ 20000	Graxa lubrificante extra-pesado para torques elevados ou aumento do efeito de fixação, válvula ou graxas ópticos.

Fonte: Bloch (2009).

Tabela 4 - Classes de consistência.

Classe de consistência DIN 51818 (NLGI)	Penetração de trabalho DIN ISSO 2137 (0,1 mm)	Textura	Aplicação geral
000	445... 475	fluido	principalmente para lubrificação de engrenagem
00	400... 430	quase fluido	
0	355... 385	extremamente macio	
1	310... 340	muito macio	lubrificação de rolamentos e mancais de deslizamentos
2	265... 295	macio	
3	220... 250	médio	
4	175... 205	duro	vedação e barreira de graxa para labirintos e válvulas
5	130... 160	muito duro	
6	85... 115	extremamente duro	

Fonte: Bloch (2009).

Os principais ensaios realizados em graxas lubrificantes são proteção contra corrosão, resistência à oxidação, resistência à lavagem por água, ponto de gota e separação do óleo (CAVALCANTE, 2012).

É recorrente equipes de manutenção mal qualificadas misturar diferentes tipos de graxas em elementos de máquinas e/ou componentes, acarretando a incompatibilidade de graxas. A incompatibilidade devido à mistura de graxas altera significativamente a diminuição de propriedades e desempenho.

Bloch (2009) afirma que a incompatibilidade devido à mistura de graxas pode afetar propriedades como: diminuição à resistência ao calor, mudança na consistência (podendo amolecer) diminuindo a estabilidade de cisalhamento, alteração nas propriedades químicas (podendo formar ácidos prejudiciais). A Tabela 5 demonstra a compatibilidade de diferentes bases de graxas lubrificantes.

Tabela 5 - Características de normas tribotécnicas.

	Alumínio complexo	Bário	Cálcio	Cálcio hidroxiesteárico 12	Cálcio complexo	Argila	Lítio	Lítio hidroxiesteárico 12	Lítio complexo	Poliuréia	Sódio
Alumínio complexo	X	I	I	C	I	I	I	I	C	I	I
Bário	I	X	I	C	I	I	I	I	I	I	I
Cálcio	I	I	X	C	I	C	C	B	C	I	I
Cálcio hidroxiesteárico 12	C	C	C	X	B	C	C	C	C	I	I
Cálcio complexo	I	I	I	B	X	I	I	I	C	C	I
Bentone (argila)	I	I	C	C	I	X	I	I	I	I	I
Lítio	I	I	C	C	I	I	X	C	C	I	I
Lítio hidroxiesteárico 12	I	I	B	C	I	I	C	X	C	I	I
Lítio complexo	C	I	C	C	C	I	C	C	X	I	I
Poliuréia	I	I	I	I	C	I	I	I	I	X	I
Sódio (base de sódio)	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	X

Onde: B - Compatibilidade incerta; C - compatível; I - incompatível.

Fonte: Bloch (2009).

2.4.2 Lubrificação sólida

Lubrificante sólido é qualquer material sólido depositado sobre duas superfícies em movimento, produzindo um filme, assim reduzindo o atrito entre essas superfícies em interação. Geralmente são utilizados onde há elevadas temperaturas (acima de 300°C), em componentes de máquinas e equipamentos onde há necessidade de lubrificação a seco, ambientes extremamente oxidantes em relação a outros lubrificantes e onde há pressões de contato extremo (MANG; DRESEL, 2007).

Os lubrificantes sólidos apresentam como característica estrutura hexagonal lamelar, anisotrópica (dependendo da direção o material tem propriedades características alteradas) e alta estabilidade química. Os lubrificantes sólidos mais empregados são grafite e o bissulfeto de molibdênio (MoS_2) (CALLISTER, 2000; MANG; DRESEL, 2007).

Mang e Dresel (2007) afirmam que os lubrificantes sólidos devem atender a três requisitos mínimos em suas propriedades, são elas:

- grande grau de aderência entre o filme do lubrificante e a superfície, pois deve haver aderência quando as superfícies estiverem sendo friccionadas;
- grande coesão interna do filme, pois o filme não pode se separar quando houver fricção;
- baixa resistência ao atrito devido à pequena adesão entre as partículas e as camadas de cisalhamento.

2.4.3 Óleos lubrificantes

Assim como os outros tipos de lubrificantes, os óleos lubrificantes também têm a função de reduzir o atrito, proteger o desgaste, evitar corrosão e oxidação, dissipar calor, boa aderência entre o filme e a superfícies, entre outras séries de aplicações. Também tem uma gama de aplicação muito variada, desde lubrificação de engrenagens à motores de combustão interna. Os óleos lubrificantes são constituídos por base mineral e base sintética.

Os óleos lubrificantes de base mineral são compostos por moléculas de hidrocarbonetos. Usualmente os óleos de base mineral são produzidos a partir de hidrocarbonetos parafínicos, mas também há óleos minerais de hidrocarbonetos naftênicos (são utilizados onde se necessita boa fluidez em temperaturas baixas) e os hidrocarbonetos aromáticos (geralmente são utilizados para propósitos de comparação entre os parafínicos e os naftênicos) (TROYER; FITCH, 2001).

Os óleos lubrificantes de base sintética utilizam um processo químico de maior custo de fabricação do que os de base mineral (são refinados através do petróleo), para a obtenção dos hidrocarbonetos sintéticos. Apresentam vantagens em relação aos óleos lubrificantes de base mineral como maior vida contra oxidação, maior resistência térmica, intervalos mais prolongados de uso e melhor lubricidade (TROYER; FITCH, 2001).

2.4.3.1 Viscosidade

A viscosidade é uma propriedade muito importante para os óleos lubrificantes. A viscosidade pode ser definida como a resistência do fluido ao escoar, ou a resistência a forças de cisalhamento.

Fluidos newtonianos apresentam como característica deformação proporcional à força de cisalhamento aplicada. Munson, Young e Okiishi (2004) afirmam, através de gráficos, que os óleos lubrificantes são classificados como fluidos newtonianos.

De acordo com Munson, Young e Okiishi (2004), a viscosidade pode ser expressa em viscosidade dinâmica (absoluta) e viscosidade cinemática. A viscosidade dinâmica é expressa pela Equação (01) e representada pela Figura 7.

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (01)$$

Na qual:

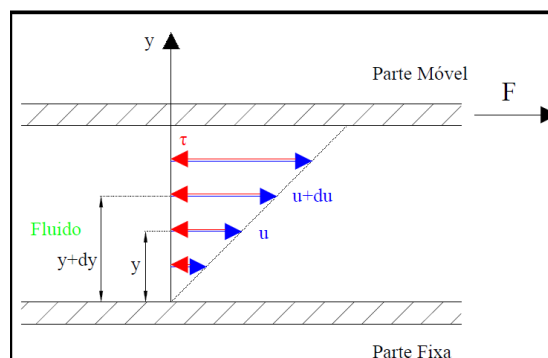
τ , tensão de cisalhamento [*Pa*];

μ , viscosidade dinâmica do fluido [*Pa.s*];

u , velocidade [*m.s⁻¹*];

y , distância [*m*];

Figura 7 - Viscosidade dinâmica



Fonte: Adaptado de Munson, Young e Okiishi (2004).

Já a viscosidade cinemática é dada pela seguinte equação:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (02)$$

Na qual:

ν , tensão de cisalhamento [$m^2.s^{-1}$, $mm^2.s^{-1}$ ou cSt];

ρ , massa específica [$kg.m^{-3}$];

A viscosidade dos fluidos em geral diminui à medida que a temperatura aumenta, devido ao fato que as forças coercivas das moléculas são reduzidas, fazendo com que haja a redução da resistência à movimentação (MUNSON; YOUNG; OKIISHI, 2004).

A variação da viscosidade pode afetar drasticamente o desempenho de máquinas e equipamentos. De acordo com Lago (2007), a redução significativa na viscosidade pode acarretar:

- perda do filme de óleo causando desgaste excessivo;
- geração de calor devido ao atrito mecânico;
- vazamento interno ou externo;
- aumento da sensibilidade para a contaminação de partícula devido à redução do filme de óleo;
- falha do filme de óleo para altas temperaturas, altos carregamentos ou durante partidas e paradas.

Já o aumento da viscosidade pode acarretar:

- excessiva geração de calor resultando na oxidação do óleo, lodo e desenvolvimento de verniz;
- cavitação gasosa devido ao fluxo inadequado de óleo para bombas e mancais
- falta de lubrificação devido ao fluxo inadequado de óleo;
- consumo excessivo de energia para superar o atrito do fluido;
- fraco bombeamento durante partidas a frio.

2.4.3.2 Classificação de óleos lubrificantes

Para cada tipo de aplicação de óleo lubrificante, há uma norma específica de classificação, que por sua vez são representados por siglas, para que haja uma padronização de óleos de diferentes fabricantes. Atualmente existem inúmeros órgãos que regulamentam a classificação de óleos lubrificantes, dentre eles pode-se citar o API, SAE, ISO.

2.4.3.2.1 Classificação API

O sistema de classificação API é baseado no tipo de serviço de aplicação e nas características de desempenho, que o óleo lubrificante irá exercer.

A Tabela 6 demonstra a classificação API de óleos lubrificantes para motores de ciclo Otto.

Tabela 6 - Classificação API de óleos para motores de ciclo Otto.

MOTORES À GASOLINA (AS INDICAÇÕES DO VEÍCULO DE FABRICAÇÃO DE NÍVEL DESEMPENHO DE ÓLEO)		
CATEGORIA	CONDIÇÃO	SERVIÇO
SN	ATUAL	Introduzido em outubro de 2010 à 2011, para motores velhos, projetados para fornecer proteção de alta temperatura para pistões contra depósito, controle de lodo mais rigorosas, e compatibilidade do selo. Com recurso de conservação API SN corresponde ao ILSAC GF- 5. Através da combinação de desempenho API SN com maior economia de combustível, proteção para turbocompressor, a compatibilidade do sistema de controle de emissões, e proteção de motores que operam com combustíveis contendo etanol até E85 .
SM	ATUAL	Para 2010 e mais motores automotivos velhos.
SL	ATUAL	Para 2004 e mais motores automotivos velhos.
SJ	ATUAL	Para 2001 e mais motores automotivos velhos.
SH	OBSOLETO	OBSOLETO: para 1996 e motores automotivo mais velhos .
SG	OBSOLETO	CUIDADO: Não é adequado para uso na maioria dos motores de automóveis movidos a gasolina construídos depois de 1993. Não pode fornecer proteção adequada contra a acumulação de lodo de motor, oxidação, ou desgaste.
SF	OBSOLETO	CUIDADO: Não é adequado para uso na maioria dos motores de automóveis movidos a gasolina construídos depois de 1988. Não pode fornecer proteção adequada contra a acumulação de lodo no motor.
SE	OBSOLETO	CUIDADO: Não é adequado para uso em motores de automóveis movidos à gasolina construídos depois de 1979.
SD	OBSOLETO	CUIDADO: Não é adequado para uso em motores de automóveis movidos à gasolina construídos depois de 1971. O uso em motores mais modernos pode causar desempenho insatisfatório ou dano no equipamento.

MOTORES À GASOLINA (AS INDICAÇÕES DO VEÍCULO DE FABRICAÇÃO DE NÍVEL DESEMPENHO DE ÓLEO)		
CATEGORIA	CONDIÇÃO	SERVIÇO
SC	OBSOLETO	CUIDADO: Não é adequado para uso em motores de automóveis movidos à gasolina construídos depois de 1967. O uso em motores mais modernos pode causar desempenho insatisfatório ou dano no equipamento.
SB	OBSOLETO	CUIDADO: Não é adequado para uso em motores de automóveis movidos à gasolina construídos depois de 1951. O uso em motores mais modernos pode causar desempenho insatisfatório ou dano no equipamento.
SA	OBSOLETO	CUIDADO: Não contém aditivos. Não é adequado para uso em motores de automóveis movidos à gasolina construídos depois de 1930. O uso em motores mais modernos pode causar desempenho insatisfatório ou dano no equipamento.

Fonte: API (2016).

2.4.3.2.2 Classificação SAE

O sistema de classificação desenvolvido pela SAE considera a viscosidade do óleo, pois o mesmo tem sua viscosidade alterada com variação de temperatura. A sigla "W"(winter) confere o grau de viscosidade para baixa temperatura. Quando não há sigla "W" os óleos lubrificantes são utilizados em temperaturas mais elevadas.

Ao longo dos anos, com o desenvolvimento de aditivos (apresentado no tópico 2.4.3.3), em especial aos melhoradores de índice de viscosidade, permitindo que óleos lubrificantes trabalhem em amplas faixas de temperaturas, sendo conhecidos como óleos multigrados.

A Tabela 7 apresenta a classificação SAE J300, para óleos lubrificantes aplicados em motores de combustão interna.

Tabela 7 - Classificação SAE J300⁽ⁱ⁾ para óleo de motores.

Grau de Viscosidade SAE	Viscosidade (cP) A temperatura °C máxima		Viscosidade (cSt) a 100°C ^(iv)		Viscosidade (cSt) após cisalhamento ^(v)
	Partida ⁽ⁱⁱ⁾	Bombeamento ⁽ⁱⁱⁱ⁾	Mín	Máx	
0 W	6200 até -35°C	60000 até -40°C	3,8	-	
5 W	6600 até -30°C	60000 até -35°C	3,8	-	
10 W	7000 até -25°C	60000 até -30°C	4,1	-	
15 W	7000 até -20°C	60003 até -25°C	5,6	-	
20 W	9500 até -15°C	60004 até -20°C	5,6	-	
25 W	13000 até -10°C	60005 até -15°C	9,3	-	
20	-	-	5,6	< 9,3	2,6
30	-	-	9,3	< 12,5	2,9
40	-	-	12,5	< 16,3	2,9 ^(vi)
40	-	-	12,5	< 16,3	3,7 ^(vii)
50	-	-	16,3	< 21,9	3,7
60	-	-	21,9	< 26,1	3,7

Notas:

i) Valores com especificações definidas pela ASTM D-3244

ii) Viscosidade aparente utilizando o Simulador de partida a frio (CCS) - Método ASTM D 5293.

iii) Viscosidade aparente utilizando o Viscosímetro rotativo (MRV) - Método ASTM D 4684.

iv) Viscosidade cinemática utilizando Viscosímetro capilar - Método ASTM D 445.

v) Viscosidade após cisalhamento de 10⁻⁶s, e temperatura de 150 °C utilizando o Viscosímetro simulador de rolamento selado - Método ASTM D 4683.

vi) Para óleos SAE 0W40, 5W40 e 10W40.

vii) Para óleos SAE 15W40, 20W40, 25W40 e 40.

Fonte: Texaco (2005).

2.4.3.2.3 Classificação ISO

Assim como o sistema de classificação SAE, o sistema ISO de classificação para óleos lubrificantes também considera apenas a viscosidade, porém considera viscosidade do óleo a uma temperatura de 40 °C.

A Tabela 8 demonstra a classificação ISO para óleos industriais.

Tabela 8 - Classificação ISO para óleos industriais.

Grau de Viscosidade ISO	Ponto Médio da Viscosidade (cSt) a 40 °C	Limites da Viscosidade Cinemática, (cSt) a 40 °C	
		Mín	Máx
2	2,2	1,98	2,42
3	3,2	2,88	3,52
5	4,6	4,14	5,06
7	6,8	6,12	7,48
10	10	9	11
15	15	13,5	16,5
22	22	19,8	24,2
32	32	28,8	35,2
46	46	41,4	50,6
68	68	61,2	74,8
100	100	90	110
150	150	135	165
220	220	198	242
320	320	288	352
460	460	414	506
680	680	612	748
1000	1000	900	1100
1500	1500	1350	1650

Fonte: Texaco (2005).

2.4.3.3 Aditivos em óleos lubrificantes

Os óleos lubrificantes base mineral de base sintética podem conter aditivos para alterar suas propriedades de desempenho. Aditivos têm como função suprimir propriedades indesejáveis do óleo, melhorar as propriedades existentes, e transmitir novas propriedades aos óleos bases (TROYER; FITCH, 2001).

Troyer e Fitch (2001), em seu trabalho descrevem os aditivos mais comuns adicionados ao óleo base, são eles:

- **Anti-oxidantes/inibidores de oxidação:** óleos lubrificantes reagem com o oxigênio, principalmente quando é exposto sob alta temperatura. As reações oxidativas podem alterar as propriedades químicas e físicas do óleo lubrificante, como aumento da acidez, escurecimento da cor, aumento da massa específica, entre outros. Os anti-oxidantes mais utilizados são sulfetos de alquila e aminas aromáticas.
- **Inibidores de ferrugem:** dependendo do material de contato interativo, a água pode agir negativamente sobre as superfícies, fazendo com que as superfícies

sofram um desgaste corrosivo. Os inibidores de ferrugem formam uma película, agindo como uma barreira repelindo a água presente nas superfícies de contato. São utilizados como inibidores de ferrugem sulfonatos, fosfatos, ácidos orgânicos, éster e aminas.

- **Detergentes e dispersantes:** detergentes ajudam a limpar superfícies sob contato. Dispersantes são moléculas polares que envolvem partículas de iodo e fuligem, fazendo com que inibam a aglomeração das mesmas em superfícies de contato. Ambos aditivos ajudam a proteger contra agentes ácidos, são compostos basicamente por sulfonato de cálcio e bário, detergentes poliméricos, compostos de amina, entre outros.
- **Aditivos/anti-desgaste(AD) e pressão extrema (AW):** são ideais quando há condições de lubrificação extrema. Quando o óleo lubrificante é submetido à alta pressão, estes aditivos quimicamente ativos reagem com a superfície do componente, formando películas de óxido de sabão macio.
- **Melhoradores de índice de viscosidade (IV):** são constituídos de polímeros (alto peso molecular), copolímeros de estirenos, ésteres, entre outros. São utilizados para diminuir a taxa alteração da viscosidade do óleo lubrificante para diferentes faixas de temperaturas, assim permite que o óleo tenha uma resistência maior com a variação de temperatura.
- **Inibidores de espuma ou anti-espuma:** têm como função inibir a formação de espumas estáveis localizadas acima do nível do óleo. É um polímero de silicone de metilo, que são distribuídos em forma micro glóbulos, estes micros glóbulos são puxados para superfície do óleo fazendo com que as bolhas sejam destruídas.
- **Abaixadores de ponto de fluidez (APP):** são polímeros adicionados aos óleos lubrificantes com o propósito de que o mesmo possa fluir e seja bambeável em temperaturas baixas, sem que possa haver a formação de um espessamento muito viscoso.

2.5 DESGASTE

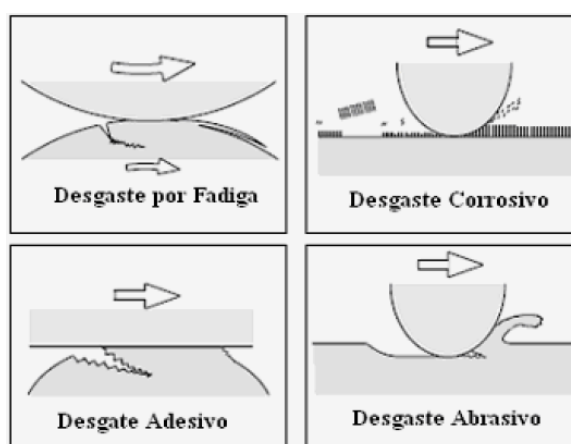
Desgaste é a perda progressiva do material, devido à interação entre as superfícies em contato com lubrificantes ou não (LAGO, 2007).

Kato e Adashi (2001) classificam o desgaste em quatro modos:

- **Desgaste por fadiga:** é uma fratura de fadiga ocasionada devido a ciclos de atrito.
- **Desgaste corrosivo:** é ocasionado devido à exposição do material em meio corrosivo, fazendo com que haja a remoção de material.
- **Desgaste adesivo:** é um desgaste gerado sobre contato plástico, ocorre a formação de fratura devido à forte adesão à superfície de contato.
- **Desgaste abrasivo:** também é um desgaste gerado sobre contato plástico, a formação de fratura ocorre de forma de um micro-corte.

A Figura 8 demonstra a formação dos modos de desgaste.

Figura 8 - Modos de desgaste.



Fonte: Kato e Adashi (2001).

As partículas de desgaste de metal como por exemplo o cobre e o ferro, se oxidam mais rapidamente, fazendo com que o óleo lubrificante perda alguns aditivos importantes como dispersantes e inibidores de ferrugem, sem contar que a ampla quantidade de partículas em suspensão aumenta a viscosidade do óleo lubrificante (TROYER; FITCH, 2001).

As partículas de desgaste podem levar máquinas e equipamentos à falha prematura de componentes, pois quando essas partículas, misturadas com o óleo lubrificante e duas superfícies de contato em interação, podem causar desgaste erosivo nas superfícies (TROYER; FITCH, 2001).

2.6 ANÁLISE DE ÓLEO LUBRIFICANTE

Há inúmeras técnicas de análise de óleo lubrificante, dentre elas pode-se citar a espectrometria, ponto de fluidez, ponto de fulgor, teste de viscosidade, contadores de partículas e a ferrografia.

De acordo com Lago (2007), a ferrografia é um artifício para se fazer estudos tribológicos em óleos lubrificantes. A ferrografia é uma técnica de manutenção preditiva que faz o monitoramento e diagnose de condições de máquinas, analisando e quantificando as partículas de desgaste de amostras de óleos lubrificantes em serviço, podendo determinar o desempenho do lubrificante, o tipo de desgaste, entre outros aspectos.

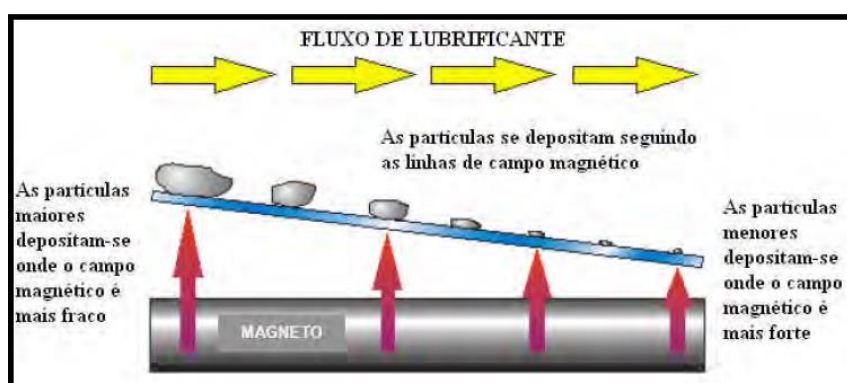
As técnicas de ferrografia dividem-se em ferrografia quantitativa e ferrografia analítica. Através da ferrografia quantitativa é possível obter informações sobre o grau de severidade de desgaste da máquina pelo óleo lubrificante. Já a ferrografia analítica apresenta a tendência anormal de desgaste, sendo que as partículas de desgaste podem apresentar tamanhos entre 1 a 250 μm (LAGO, 2007).

Ferrogramas analíticos são lâminas e/ou lamínulas transparentes onde as partículas magnéticas são depositadas sobre o mesmo, sendo separados por tamanho através de um campo magnético, a identificação da morfologia dessas partículas de desgaste e a mensuração das mesmas são feitas através de um microscópio eletrônico (LAGO, 2007).

2.6.1 Ferrogramas analíticos

Um aparato muito utilizado é o separador de partículas linear que, através de um campo magnético as partículas se ordenam em tamanhos diferentes ao longo da lâmina, sendo que partículas maiores são depositadas primeiro, como pode ser observado na Figura 9.

Figura 9 - Separador de partículas linear.



Fonte: Lago (2007).

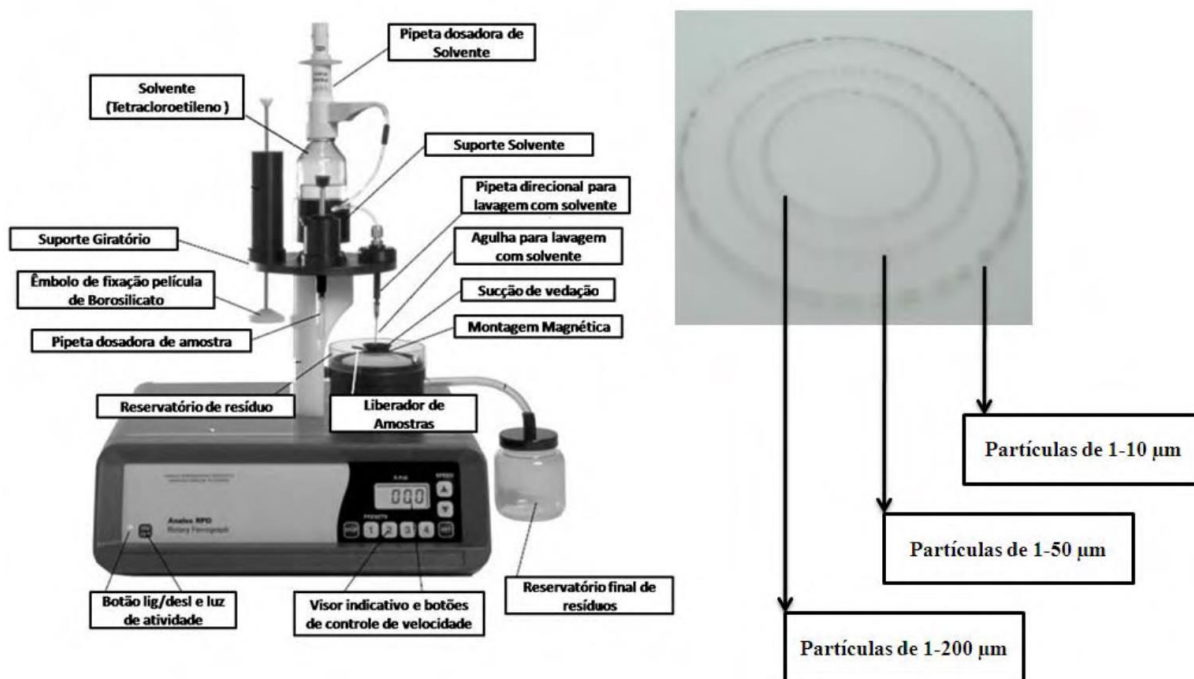
Quanto menor a quantidade de partículas ferrosas presentes na amostra de óleo lubrificante, menos eficiente são os métodos de ferrogramas analíticos.

De acordo com Bivirt (2004) citado por Lago (2007), partículas da ordem de 1-10 μm indicam desgaste normal do equipamento. Partículas de tamanho 1-50 μm representam início de desgaste severo do equipamento. Já as partículas de magnitude de 1-100 μm evidenciam desgaste severo tendendo levar a falha da máquina.

Outro aparato para separar as partículas presentes no óleo lubrificante é o separador rotativo de partículas (RPD), esse aparato utiliza forças magnéticas, centrífugas e gravitacionais para a separação de partículas. Essas partículas são depositadas sobre uma lamínula em três anéis concêntricos. No anel interno ficam depositadas partículas de 1-200 μm , enquanto no anel do meio ficam depositadas partículas de 1-50 μm , e no anel externo são depositadas partículas da ordem de 1-10 μm .

A Figura 10 demonstra o separador de partículas rotativo (RPD) e o ferrograma obtido.

Figura 10 - Separador de partículas rotativo e o ferrograma obtido.



Fonte: Kimura (2010).

De acordo com Kittiwake (2004), para confeccionar um ferrograma utilizando o RPD, deve-se seguir algumas etapas, são elas:

- a amostra do óleo lubrificante deve se apresentar de forma homogênea;
- o óleo lubrificante deve ser aquecido antes a uma temperatura de 60 °C;

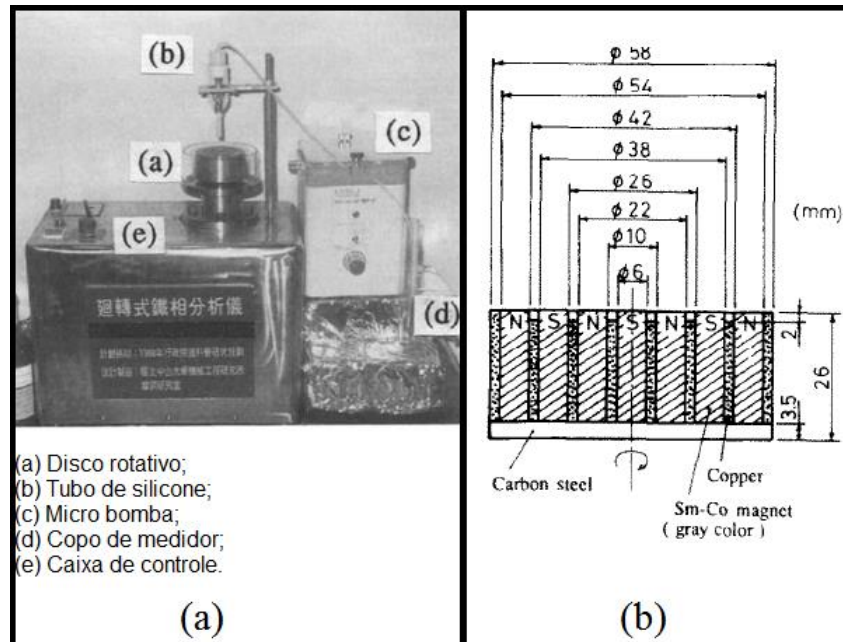
- fixar a lâmina no êmbolo de fixação;
- com a pipeta dosadora, deve-se depositar a amostra do lubrificante sobre a lamínula;
- ativar o equipamento na velocidade 1 (70 *RPM*) e despejar 1 *ml* de tetracloroetileno sobre a amostra;
- após dois minutos alterar a rotação para velocidade 2 (100 *RPM*) e despejar 1 *ml* de tetracloroetileno sobre a amostra, verificando se há a diminuição do filme do óleo lubrificante, caso não haja diminuição repita esse passo até que haja a diminuição do filme de óleo sobre a amostra;
- após dois minutos alterar a rotação para velocidade 3 (130 *RPM*) e despejar 1 *ml* de tetracloroetileno sobre a amostra;
- após dois minutos alterar a rotação para velocidade 4 (200 *RPM*) por alguns minutos.

Chiou (1991) desenvolveu um separador de partículas rotativo, e o denominou de analisador ferrográfico rotativo melhorado (AFR), mostrado na Figura 11 (a), com o propósito de separar partículas de óleo lubrificantes sem a utilização de solventes químicos.

O autor confeccionou um disco rotativo que é composto por quatro ímãs de samário-cobalto, em forma de cilindros concêntricos, para o controle da rotação foi utilizado um motor elétrico do tipo passo. Os ímãs de samário-cobalto foram confeccionados pelo autor por meio do processo de sinterização, para que não houvesse microfissuras de fabricação, assim, foram adotados espessura de 6 *mm* para os ímãs de cilindros concêntricos. Entre esses ímãs, foram utilizados cilindros concêntricos de cobre, ilustrado na Figura 11 (b).

Para a confecção dos ferrogramas Chiou (1991), utilizou lamínulas de quartzo de 1 *mm* de espessura. Através de duas amostras de óleo, o autor obteve ferrogramas com quatro anéis concêntricos de boa qualidade, com boa separação das partículas de desgaste por tamanho.

Figura 11 - Separador de partículas rotativo e o ferrograma obtido.



Fonte: Chiou (1991).

2.7 MAGNETISMO

Como citado anteriormente, o separador de partículas rotativo convencional utiliza forças magnéticas e outras em conjunto. Antes de mais nada é necessário entender sobre os fundamentos básicos do magnetismo.

Os átomos são constituídos através de um núcleo circundado por elétrons, o núcleo é composto por prótons e nêutrons, para cada próton há um elétron para contrabalancear. A órbita mais externa de um núcleo o elétron é atraído com menor intensidade, assim, maior será a facilidade de desalojá-lo do átomo.

Os elétrons se movimentam constantemente em próprio eixo através de sua órbita, devido a esse movimento de rotação dos elétrons em seu eixo é gerado o campo magnético (FARIA; LIMA, 2005).

De acordo com Faria e Lima (2005), estas velocidades são muito elevadas, o presente trabalho não tem o intuito de mensurar essas velocidades, mas para se ter uma noção dessas magnitudes, a velocidade do elétron em sua órbita circular pode ser calculada através da Equação (03), e o campo magnético gerado por um elétron em sua órbita circular é calculado através da Equação (04).

$$v = \sqrt{\frac{kZe^2}{rm}} \quad (03)$$

$$B = \frac{ev}{r^2} \quad (04)$$

Na qual:

k , constante dielétrica [$9,0 \cdot 10^9 \text{ N.m}^2.\text{C}^{-2}$];

Z , carga do núcleo;

e , carga elétrica negativa [C];

r , raio da órbita do elétron [m];

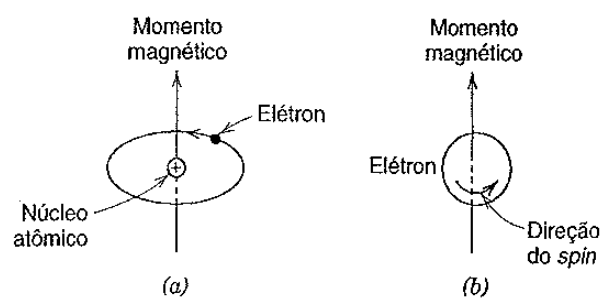
m , massa do elétron [kg];

v , velocidade do elétron [m.s^{-1}];

B , campo magnético [$\text{N.A}^{-1}.\text{m}^{-1}$, Wb.m^{-2} ou T];

Faria e Lima (2005) descrevem ainda que o magnetismo se dá pelo momento angular orbital do elétron, representado pela Figura 12 (a) e também pelo momento angular do *spin*, representado pela Figura 12 (b).

Figura 12 - Momentos magnéticos.



Fonte: Callister (2000).

Momento magnético é a somatória vetorial de todos os momentos eletrônicos. Nos materiais diamagnéticos os elétrons são orientados de tal forma que se anulam, assim o átomo não apresenta qualquer momento magnético. Já nos materiais paramagnéticos, ferromagnéticos, ferrimagnéticos e antiferromagnéticos a somatória dos elétrons é orientada de tal forma que se anulam, porém, o átomo apresenta um certo momento magnético (FARIA; LIMA, 2005).

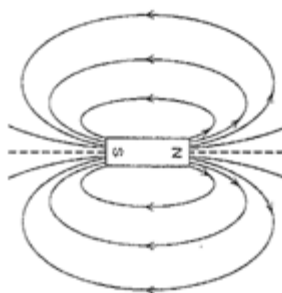
Callister (2000), afirma que os materiais diamagnéticos apresentam uma forma fraca de magnetismo, que não é permanente e continua somente quando um campo magnético externo está sendo aplicado, um exemplo de material diamagnético é o cobre. Os materiais paramagnéticos apresentam como característica o alinhamento dos dipólos (positivos e negativos) magnéticos atômicos através de um campo magnético externo, ao se retirar campo externo os dipolos magnéticos atômicos voltam a ser desalinhados, não apresentando campo magnético, exemplo de materiais paramagnéticos é o alumínio e o magnésio.

Os materiais ferromagnéticos apresentam dipolos magnéticos atômicos alinhados sem a presença de um campo magnético externo. Enquanto os materiais ferrimagnéticos ou ferrites apresentam um momento magnético permanente, também apresentam dipolos magnéticos atômicos alinhados sem a presença de um campo magnético externo (CALLISTER, 2000).

Nos materiais antiferromagnéticos há um alinhamento antiparalelo de *spin*, assim, os momentos magnéticos contrários se anulam, portanto, não apresentam qualquer momento magnético resultante (CALLISTER, 2000).

Os momentos magnéticos não nulos geram diversos campos magnéticos, que por sua vez são indicados pelas linhas de força, como representado na Figura 13. Os campos magnéticos tendem ordenar os elétrons, essa ordenação faz com que os objetos próximos, que não tenham ordenação sejam atraídos, tentando ordená-los.

Figura 13 - Linhas de força.



Fonte: Callister (2000).

Como observado na Figura 13, as linhas de força ocorrem através dos dipolos, ou seja, pelo pólo norte (ou pólo positivo) para o pólo sul (ou pólo negativo).

Os momentos magnéticos são vinculados ao alinhamento dos elétrons, devido ao aumento de temperatura o grau de agitação tende a aumentar, assim, há desalinhamentos dos elétrons afetando diretamente os momentos magnéticos, portanto, a temperatura influencia

diretamente sobre o comportamento magnético, diminuindo a força magnética (CALLISTER, 2000; SHACKELFORD, 2013).

2.7.1 Ímãs permanentes e temporários

Ímãs permanentes apresentam campos magnéticos constantes, contínuos e apresentam alta resistência à desmagnetização magnética, são conhecidos também como materiais magnéticos duros. Apresentam alta remanência e coercividade (CALLISTER, 2000).

Os ímãs permanentes mais comuns são os ímãs de AlNiCo, ímãs de NdFeB, ímãs de SmCo e os ímãs de ferrite de estrôncio e bário.

Os ímãs temporários são decorrentes através da passagem de corrente elétrica em um condutor, fazendo com que os elétrons sejam alinhados e se movimentem de uma forma linear em uma velocidade elevada, além do movimento linear os elétrons também rotacionam, gerando campo magnético (Figura 14), tendo comportamento semelhante ao de um ímã permanente.

Figura 14 - Representação do campo magnético temporário.



Fonte: Esquemas Eletrônicos (2016).

2.7.2 Medidas magnéticas

É necessário conhecer e mensurar grandezas magnéticas. Dentre as grandezas magnéticas mais importantes, pode-se citar a remanência, coercividade, coercividade intrínseca e o máximo produto energético.

A remanência é o campo magnético permanente após a retirada de um campo magnético, que foi utilizado para a sua magnetização. Quanto maior quantidade de grãos monocristalinos na direção de um campo magnético externo, maior será a facilidade de magnetizá-lo e maior será a remanência. Quanto maior for a remanência de um ímã permanente, maior será a coercividade. Sua unidade de medida é Tesla [T] ou Gauss [G] (FARIA; LIMA, 2005).

A coercividade é a energia máxima para que seu campo magnético reduza a zero. Quanto maior a coercividade mais difícil será a sua desmagnetização. Há fatores que contribuem para coercividade, como o tamanho dos grãos, o espaço entre grãos e a orientação dos grãos. A unidade de medida mais usual é Gauss [G] ou Oersted [Oe]. Já a coercividade intrínseca é a energia máxima para que se possa desmagnetizar o ímã permanentemente. Sua unidade de medida mais usual é Ampere por metro [$A.m^{-1}$] ou Oersted [Oe] (ANOCIBAR, 2011).

O máximo produto energético é a quantidade de energia no campo magnético pelo volume do ímã permanente. A unidade de medida é o Joule por metro cúbico [$J.m^{-3}$] ou Gauss Oersted [GOe] (ANOCIBAR, 2011).

A densidade de fluxo magnético é a quantidade de vetores do campo magnético que atravessam uma superfície. Sua unidade de medida é Tesla [T] ou Gauss [G] (FARIA; LIMA, 2005).

2.7.3 Processo de fabricação dos ímãs permanentes

De acordo Chiaverini (1986), a grande maioria dos ímãs permanentes, como os ímãs AlNiCo, NdFeB, SmCo e ferrite de estrôncio e bário são feitos pelo processo de fabricação denominado de metalurgia do pó, onde se pode unir diferentes elementos que através de outros meios são difíceis ou irrealizáveis.

Neste processo produtivo, os elementos químicos em forma de pós são misturados e homogeneizados por meios mecânicos. Após os elementos na forma dos pós serem misturados e homogeneizados é feita a compactação através de prensas, onde punções opostas comprimem os pós contidos na matriz, assim conferindo forma à peça, reduzindo espaços vazios e aumentando o contato entre as partículas. Após a compactação é feito um tratamento térmico chamado de sinterização, através de fornos especiais (GROOVER, 2014).

A sinterização é feita em temperaturas abaixo do ponto de fusão dos elementos compactados, geralmente de 70% a 90% do ponto de fusão. A sinterização une as partículas compactadas, aumentando o coalescimento entre elas, resultando o aumento da resistência e da dureza, no caso dos ímãs há um aumento das propriedades magnéticas (GROOVER, 2014).

Os ímãs de ferrite são fabricados à base de pós de óxido de ferro em conjunto com estrôncio ou bário. São fabricados com os tipos anisotrópicos e isotrópicos. Os ímãs de ferrite anisotrópicos são submetidos a um campo eletromagnético durante seu processo de fabricação, assim, adquirindo melhores propriedades magnéticas do que os isotrópicos. Já os ímãs de ferrite

isotrópicos são produzidos sem qualquer orientação magnética, podendo ser magnetizados em qualquer sentido (MAGNAWORKS, 2016).

Os ímãs de AlNiCo são constituídos através de alumínio, níquel e cobalto, tendo uma pequena quantidade de ferro, cobre e titânio para otimizar as propriedades magnéticas. Assim como os ímãs de ferrite, podem ser fabricados com os tipos anisotrópicos e isotrópicos. Apresentam fácil magnetização e, consequentemente, fácil desmagnetização (MAGNAWORKS, 2016).

Os ímãs SmCo, são compostos de cobalto e samário, além de pequenas quantidades de ferro, cobre e zircônio para otimizar as propriedades magnéticas. Durante seu processo de fabricação um campo magnético é aplicado durante a compactação. Apresentam elevadas propriedades magnéticas em relação aos ímãs de ferrite e os AlNiCo, excelente resistência à corrosão, além da estabilidade térmica (MAGNAWORKS, 2016).

Os ímãs de NdFeB são comumente chamados de ímãs de neodímio. Além da metalurgia do pó, os ímãs de NdFeB podem ser fabricados pelo método de solidificação rápida. No método de solidificação rápida, a liga de NdFeB é fundida, posteriormente há um resfriamento muito rápido, formando uma fina fita amorfa de granulação muito fina, posteriormente essa fita é triturada e compactada na forma pretendida. Após a compactação é efetuado um tratamento térmico (CALLISTER, 2000).

Os ímãs permanentes provenientes da metalurgia do pó e da sinterização apresentam dureza elevada, sendo assim, baixa usinabilidade (CHIAVERINI, 1986).

2.8 MOTORES ELÉTRICOS

No separador de partículas rotativo convencional, além das forças magnéticas e gravitacionais, as amostras estão sujeitas a forças centrífugas.

Forças centrífugas são obtidas através de energia mecânica rotativa. Motores elétricos são dispositivos que convertem energia elétrica em energia mecânica rotativa. Há cinco tipos de motores de corrente contínua, motores de excitação independente, motores em derivação, motores de ímã permanente, motores de série e os motores compostos (FALCONE, 2011; CHAPMAN, 2013).

Os motores de corrente contínua com ímã permanente, são divididos em motores com escovas (*motor brush*) e motores sem escovas (*motor brushless*). O motor elétrico de corrente contínua com escovas é composto por duas partes o estator e o rotor (CHAPMAN, 2013).

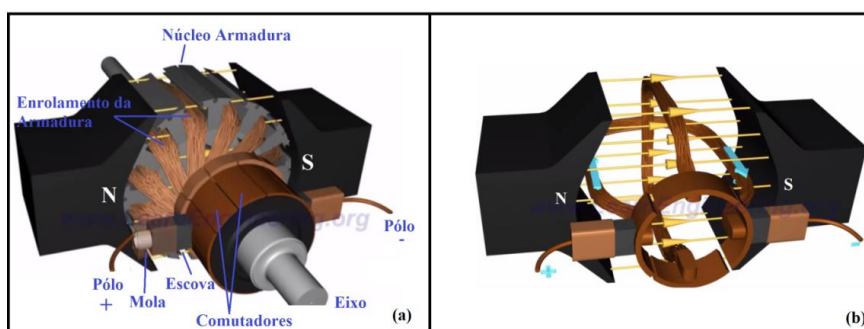
Em motores elétricos de pequeno porte (como é o caso do projeto), o estator é composto pela carcaça, pelos pólos de alimentação e pelas escovas. O rotor é composto essencialmente pelo núcleo da armadura, enrolamento da armadura, comutadores e o eixo (FRANCISCO, 2013).

A carcaça é a parte externa do motor, geralmente de forma cilíndrica, que tem a função de proteger e alojar todos os componentes internos, apoiando os mancais do eixo. Para motores elétricos de pequeno porte, um ímã permanente é fixo na carcaça. Os pólos de alimentação têm a função de conduzir a corrente elétrica para dentro do motor, através das escovas. As escovas podem ser feitas de carvão, grafite, agregados de pó de cobre (PETRUZELLA, 2013; FRANCISCO, 2013).

O eixo exerce a função de transferir energia mecânica na parte externa do motor. Os comutadores são fixos ao eixo, assim como o núcleo da armadura que, por sua vez, tem a função de alojar os enrolamentos através das ranhuras, como pode ser visto na Figura 15 (a).

O enrolamento é composto de fios de cobre que tem a função de gerar campo magnético quando há passagem de corrente elétrica. Cada par de comutador interliga os terminais do enrolamento, como ilustrada na Figura 15 (b). É necessário alimentar o comutador com corrente elétrica para que possa gerar campo magnético no enrolamento, essa alimentação é feita através do atrito das escovas.

Figura 15 - Motor elétrico de corrente contínua de ímã permanente com escovas.



Fonte: Adaptado de Learn Engineering (2016).

Uma vez que os comutadores e o núcleo da armadura são fixos ao eixo, consequentemente, são transladados em conjunto. O movimento de rotação do eixo se dá pela repulsão entre o campo magnético gerado pelo enrolamento e o ímã fixo à carcaça, pois apresentam a mesma polaridade magnética. Ao girar em certa posição o par de comutador troca seu contato com a escova, invertendo, assim, o sentido da corrente elétrica e, consequentemente, tendo a polaridade magnética do enrolamento invertida.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta os materiais e os métodos utilizados para a execução do projeto e confecção do protótipo para a realização de ferrografia. Este capítulo está dividido em projetos, seleção de materiais, usinagem, componentes elétricos e eletrônicos, ímãs utilizados, amostras e metodologia de trabalho.

3.1 PROJETO

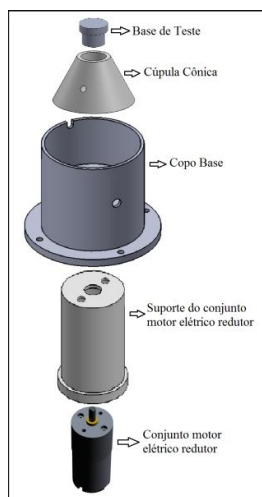
Com o objetivo de realizar ferrogramas em lamínulas quadradas de 36x36 mm para microscopia, o projeto do protótipo foi desenvolvido. As lamínulas foram fornecidas pelo Laboratório de Tribologia do Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (FEIS/UNESP).

O protótipo tem a função de centrifugar pequenas quantidades de amostras de óleos lubrificantes usados, depositadas sobre a lamínula formando assim ferrogramas.

Alguns componentes apresentaram a necessidade de dimensionamento devido a esforços atuantes sobre o protótipo. Já em outros componentes não houve a necessidade de realizar cálculos estruturais, pois os esforços atuantes são mínimos.

O projeto do protótipo foi realizado utilizando *software* CAD (SolidWorks). O projeto do protótipo conta com as partes: copo base, suporte do conjunto motor elétrico redutor, cúpula cônica, base de teste e conjunto de fixação de lamínulas. Os detalhes sobre os desenhos técnico de todos os componentes do protótipo encontra-se no Apêndice A. A Figura 16 mostra algumas partes do protótipo.

Figura 16 - Vista explodida de algumas partes do protótipo.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

3.1.1 Base de teste

O objetivo da base de teste é apoiar a combinação de ímãs. A base de teste e os ímãs são fixados permanentemente. O material escolhido para a base de teste foi a poliamida 6 (justificado no tópico 3.2.1).

Com o intuito de testar diferentes combinações de ímãs (abordado no tópico 3.5.1), surgiu a ideia de intercambiabilidade da base de teste e a sua fixação. A base de teste apresenta na sua base em contato com o ímã o diâmetro de 23,5 mm e altura total de 15 mm. A base contém a altura de 5 mm enquanto a fixação tem altura de 10 mm. O sistema de fixação da base de teste se dá por rosca.

Shigley (1984), em sua obra, demonstra os padrões de rosca padronizados pela norma ISO, para o projeto a fixação contou com o diâmetro nominal de 3/4", 16 filetes por polegada, rosca UNF.

Não foram realizados cálculos estruturais para esta peça, visto que os esforços atuantes são mínimos. Foram confeccionadas cinco unidades de base de teste. A Figura 17 mostra a base de teste confeccionada.

Figura 17 - Base de teste.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

3.1.2 Cúpula cônica

A função da cúpula cônica é fixar a base de teste, além de transmitir a rotação do conjunto motor elétrico-redutor, para que haja a centrifugação da lamínula sobre óleo lubrificante. O material escolhido para a cúpula cônica foi a poliamida 6.

Visando a intercambiabilidade da base de teste e a sua fixação, a cúpula cônica na parte superior tem a furação com diâmetro nominal de 3/4", 16 filetes por polegada, rosca UNF. A cúpula apresenta uma altura total de 32 mm. Na parte inferior há uma furação para o encaixe do eixo do conjunto motor elétrico-redutor e do suporte do motor elétrico.

O conjunto motor elétrico-redutor apresenta em seu eixo uma face plana lateralmente como pode ser visto na Figura 25. Para a fixação da cúpula cônica ao eixo do conjunto motor elétrico-redutor, se deu através de um parafuso tipo Allen, para isso foi realizado uma furação lateral da cúpula cônica com diâmetro nominal de 5 *mm* passo de 0,8 *mm* (M5x0,8), a 15 *mm* de altura de sua base.

Não foram realizados cálculos estruturais para esta peça, visto que os esforços atuantes são mínimos. Também não foram realizados estudos dinâmicos, sendo que o elemento irá trabalhar em baixa rotação (com rotação máxima de 200 RPM).

3.1.3 Suporte para conjunto motor elétrico-redutor

Como o próprio nome atribuído lhe sugere a função de suporte para o conjunto motor elétrico-redutor, teve como o material escolhido a poliamida 6. Foi confeccionada uma peça para o suporte para o motor elétrico

O suporte para o motor elétrico apresenta uma altura total de 54,40 *mm*, sendo que sua base apresenta uma altura de 5 *mm* e o restante de 49,40 *mm*.

A peça apresenta um diâmetro interno de 27,50 *mm* para alojar o conjunto motor elétrico-redutor, na parte superior apresenta três furações, a furação central possui diâmetro de 10 *mm*, para a passagem do eixo. Já as duas furações mais externas (17 *mm* entre eixos) apresentam diâmetro nominal de 3 *mm*, passo de 0,5 *mm* (M3x0,5), para a fixação do conjunto motor elétrico redutor. A fixação do conjunto motor elétrico-redutor em seu suporte se dá por dois parafusos do tipo Allen. Não foram realizados cálculos estruturais para esta peça visto que os esforços atuantes são mínimos.

A parte superior tem o diâmetro de 36 *mm*, enquanto a base possui o diâmetro de 40 *mm* para sua fixação. A fixação do suporte se dá pelo encaixe feito na parte inferior ao do copo base.

3.1.4 Copo base

O copo base tem como função fixar o suporte do motor, além de não deixar atirar solvente e óleo lubrificante em centrifugação quando estiver confeccionando o ferrograma. O material escolhido para o copo base foi a poliamida 6. Foi confeccionada uma unidade de copo base.

O copo base possui uma altura total de 65 *mm*, sendo a altura de fixação de 5 *mm*. A base possui o diâmetro externo de 85 *mm*, enquanto o restante possui o diâmetro externo de 64 *mm* e diâmetro interno de 60 *mm*.

Foi realizado um rasgo na parte superior com 5 *mm* de altura para a passagem da chave tipo Allen, para fixação da cúpula cônica ao eixo do conjunto motor elétrico-redutor. Na face oposta foi realizado uma furação lateral com diâmetro de 6 *mm* para o escoamento do óleo e do solvente. Utilizou-se um tubo flexível transparente para conduzir o óleo e o solvente até o recipiente de descarte.

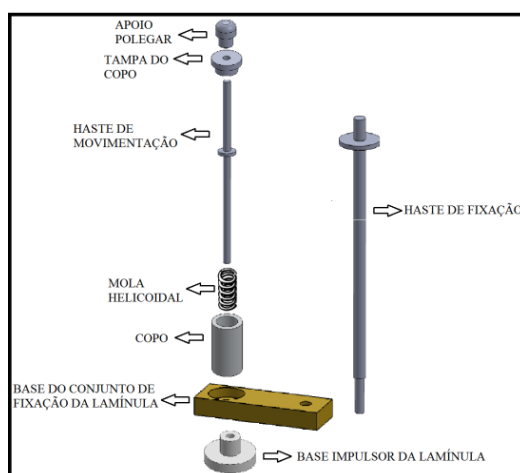
Na parte inferior há quatro furações para fixação. O copo base foi fixado sobre uma chapa inferior de apoio, utilizada para a fixação do mesmo, além de quatro parafusos cabeça chata do tipo Philips 3,5 x 25 *mm*. Não foram realizados cálculos estruturais para esta peça visto que os esforços atuantes são mínimos.

3.1.5 Conjunto de fixação da lamínula

Sobre a base de teste é utilizada uma ventosa que tem a função de criar vácuo para fixação das lamínulas para microscopia. Porém, para criar o vácuo é necessário empurrar a lamínula sobre a ventosa. A ventosa foi fornecida pelo Laboratório de Tribologia do Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (FEIS/UNESP).

O conjunto de fixação da lamínula conta com as seguintes partes: apoio polegar, tampa do copo, haste de movimentação, mola helicoidal, copo, base do suporte, haste de movimentação, base impulsora da lamínula e haste de fixação. O conjunto de fixação da lamínula é demonstrado na Figura 18.

Figura 18 - Conjunto de fixação da lamínula.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Para a fixação da lamínula, a mesma deve ser bem centralizada sobre a ventosa e também em relação à base impulsora. A má centralização de ambos poderá quebrar a lamínula. A mão do operador deve ser apoiada pelo copo através do polegar apoiado sobre a peça superior (apoio polegar). Este deverá pressionar a haste e realizar movimento no sentido vertical para baixo, movendo juntamente a base impulsora da lamínula, fazendo com que a lamínula fique presa à ventosa.

Ao retirar o esforço, a haste de movimentação retorna à sua posição inicial através de uma mola helicoidal que se situa no interior do copo. Os detalhes da mola helicoidal se encontram no Apêndice B no tópico B.1.

O apoio polegar, tampa do copo, copo, base do suporte, base impulsor da lamínula foram confeccionados utilizando a poliamida 6 como material.

O apoio polegar possui o comprimento total de 19 *mm*, uma furação na parte inferior com diâmetro de 6 *mm* por 13 *mm* de profundidade, para acoplar a extremidade da haste de movimentação. Não foram realizados cálculos de esforços atuantes para esta peça, visto que a peça é para ter um melhor apoio do polegar do operador.

Para a confecção da haste de movimentação, utilizou-se o aço SAE 1020, com 6,35 *mm* de diâmetro, com comprimento total de 170 *mm*. Na parte superior foi soldada uma arruela de aço de 16 *mm* de diâmetro externo, 6,35 *mm* de diâmetro interno e com 3 *mm* de altura, para o apoio da parte superior da mola helicoidal. O processo de soldagem utilizado foi o GTAW, devido ao pequeno diâmetro da haste e pequena espessura da arruela. Os detalhes de flambagem da haste de movimentação se encontra no Apêndice B no tópico B.2.

A base impulsora da lamínula possui uma altura de base de 7 *mm* e um diâmetro de 35 *mm*. A parte superior possui uma altura de 12 *mm* e um diâmetro de 14 *mm*. Não foram realizados cálculos de esforços atuantes para esta peça, visto que a peça é para ter um melhor apoio entre a haste de movimentação e a lamínula.

Sobre a tampa do copo há uma furação com diâmetro de 6 *mm* por 13 *mm* de profundidade, para a passagem da haste de movimentação (extremidade ao apoio polegar).

O copo apresenta um comprimento total de 45 *mm*, e altura interna de 40 *mm*. O diâmetro externo do copo é de 25 *mm*, e o diâmetro interno é 17,50 *mm*. Em sua base apresenta uma furação de 6,55 *mm* para a passagem da haste de movimentação. Na parte interna superior apresenta uma rosca UNF, diâmetro nominal de 3/4", 16 filetes por polegada, para a fixação de sua tampa. Não foram realizados cálculos de esforços atuantes para o copo e sua tampa, visto que os esforços atuantes são mínimos.

A base do conjunto possui um comprimento total de 90 *mm*, 30 *mm* de largura e uma altura de 12,70 *mm*. Possui duas furações, uma para apoiar o copo e permitir a passagem da haste de movimentação e outra oposta para apoiar na haste de fixação. Os detalhes de flexão da base do suporte se encontra no Apêndice B no tópico B.3.

É necessário realizar o movimento de rotação de todo o conjunto, pois o espaço sobre a lamínula permanece livre para manuseio do óleo e do solvente. Portanto, não houve fixação na parte superior da haste de fixação e da base do suporte.

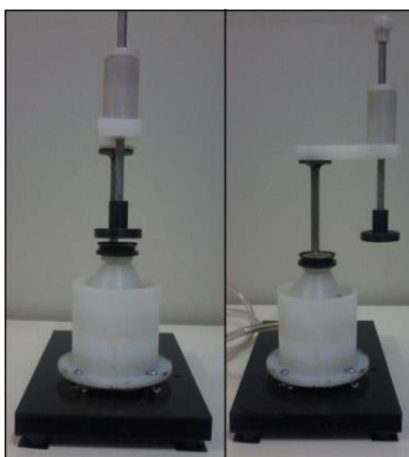
Para a confecção da haste de fixação, foi utilizado aço SAE 1020, com 8 *mm* de diâmetro, com comprimento total de 210 *mm*, sendo que uma ponta da haste com altura de 35 *mm* possui uma rosca métrica com o diâmetro nominal de 6 *mm*, passo de 1 *mm* (M16x1), para sua fixação.

Na parte superior da haste de fixação, localizada 12,70 *mm* de cima para baixo, foi soldada uma arruela de aço de 28 *mm* de diâmetro externo, 8 *mm* de diâmetro interno e com 3 *mm* de altura, para apoiar a base do suporte. O processo de soldagem utilizado foi o GTAW, devido ao pequeno diâmetro da haste e pequena espessura da arruela. Os detalhes de flambagem da haste de fixação se encontra no Apêndice B no tópico B.4.

3.1.6 Chapa inferior de apoio

Para apoiar o copo base e a haste de fixação do conjunto de fixação da lamínula, foi utilizado uma chapa retangular com 100 *mm* de comprimento, 200 *mm* largura com 8 *mm* de altura feito de fibra de madeira de média densidade (comumente designado de MDF). A Figura 19 mostra o copo base e a haste de fixação sobre a chapa de MDF.

Figura 19 - Apoio do copo base e a haste de fixação.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

No eixo do copo de base foi realizada uma furação com 8 *mm* de diâmetro na chapa inferior de apoio, para a passagem da fiação do motor elétrico.

A haste de fixação está localizada a 58 *mm* do eixo do copo. A fixação da haste se deu através de uma arruela de contato de aço, de 18 *mm* de diâmetro externo, 6,90 *mm* de diâmetro interno e com 1 *mm* de altura, e uma porca sextavada de aço M6x1 com 5 *mm* de altura. Não foram realizados cálculos estruturais para esta peça visto que os esforços atuantes são mínimos.

3.2 SELEÇÃO DE MATERIAIS

A seleção dos materiais em projetos mecânicos são de extrema importância, pois a má escolha pode provocar prejuízos irreparáveis. Os prejuízos causados pela má escolha do material vão desde de custos financeiros até mesmo acidentes com vítimas fatais.

As falhas dos materiais estão correlacionadas desde o projeto impróprio à aplicação, seleção incorreta do material ou processamento inadequado do material.

Na seleção dos materiais para a construção do protótipo, foram considerados itens fundamentais como: aplicação, propriedades, disponibilidade e custo.

Os materiais selecionados e utilizados neste projeto foram a poliamida 6 (mencionado nos tópicos 3.1.1 à 3.1.5), aço SAE 1020 (mencionado nos tópicos 3.1.5 e 3.5) e o bronze TM23 (mencionado tópico 3.5).

Os tópicos 3.2.1 à 3.2.3, demonstram a fundamentação teórica e prática para a seleção dos materiais utilizados no projeto.

3.2.1 Poliamida

Segundo Shackelford (2013), plástico é um sinônimo comumente utilizado em substituição ao termo polímero. Constitui por sua vez um termo derivado da deformabilidade associado ao processo de fabricação da maioria dos produtos poliméricos. Segundo o autor, os polímeros podem ser classificados em duas categorias: polímeros termoplásticos e termofixos. Os polímeros termo plásticos são materiais que se tornam menos rígidos quando aquecidos, enquanto os polímeros termofixos se tornam mais rígidos com o aquecimento.

O termo polímero significa “muitos meros”, onde mero é o bloco de montagem da cadeia longa ou da rede. A polimerização (processo pelo qual moléculas da cadeia longa ou em rede são formadas a partir de moléculas orgânicas relativamente pequenas) pode se dar em um processo rápido através da união de monômeros individuais pelo crescimento em cadeia por

meio da ativação química (polimerização por adição) ou pelo crescimento em estágios (polimerização por condensação), o qual envolve reações químicas individuais e lentas entre pares de monômeros reativos. De qualquer forma, a característica crítica de um monômero, que permite sua união com moléculas semelhantes e a formação de um polímero, é a presença de sítios reativos – ligações duplas no crescimento em cadeia, os grupos funcionais reativos no crescimento em estágios (SHACKELFORD, 2013)

De acordo com Crawford (1998), os plásticos de engenharia oferecem vantagens em relação a outros materiais em algumas propriedades específicas, tais como: baixa densidade, alta resiliência (capacidade de um material absorver energia mecânica em regime elástico), resistência a corrosão, facilidade de processamento, dentre outras. Por outro lado, sua aplicação torna-se limitada quando se necessita de propriedades mecânicas, tais como rigidez ou resistência térmica.

Dentro da classe dos termoplásticos tem-se a poliamida 6, o número 6 representa a quantidade de carbono lactama em sua estrutura molecular. Apresenta como características boa rigidez e tenacidade, além de ser inerte a quase todos os tipos de óleos e solventes existentes (GUTIÉRREZ, 2014)

Além das características citadas acima, a poliamida 6 é muito comum ao ramo comercial, portando, apresenta baixo custo em relação aos outros tipos de poliamida existentes no mercado. A poliamida 6 é comumente chamado de náilon 6 ou tecnil 6.

3.2.2 Aço

Há diversos elementos que podem ser adicionados ao ferro, para aumentar a resistência mecânica e usinabilidade, dentre outras características. Uma liga muito comum é o aço, onde o carbono é adicionado ao ferro com porcentagem de 0,008% até 2,11% da sua composição (CHIAVERINI, 1986).

As ligas de ferro e carbono apresentam um sistema eutético, ou seja, facilidade de fundição (propriedade eutética) da liga que está correlacionada com a quantidade de solvente e soluto, onde o ferro é o solvente β e o carbono o soluto α , no diagrama de fases ferro-carbono (CALLISTER, 2000).

De acordo com a SAE, a classificação do aço se dá por quatro dígitos. Os dois primeiros dígitos remetem-se ao aço e liga adicionada, enquanto os dois últimos dígitos, remetem-se à quantidade de carbono presente no aço.

O aço de menor porcentagem de carbono encontrado comercialmente na região de Rio Verde - GO é o aço SAE 1020. O aço SAE 1020 apresenta uma porcentagem de carbono de até

0,20% em sua composição e nenhuma liga adicionada. As barras encontradas comercialmente de aço SAE 1020, apresentam um menor custo em relação a barras de porcentagem maior de carbono. As barras adquiridas são trefiladas a frio, não foram encontradas barras de aço SAE 1020 trefiladas a quente.

Para a haste de fixação e a haste de movimentação para de fixação da lamínula foi adotado o aço SAE 1020.

Quanto maior a porcentagem de carbono no ferro, menor serão as propriedades ferromagnéticas, pois o carbono fundido ao ferro tende a anular os momentos magnéticos do ferro (FARIA; LIMA, 2005).

Com o intuito de testar uma combinação distinta (tópico 3.5), não foi encontrado ferro sem adição de ligas para venda comercial, sendo assim, foi necessário recorrer à utilização de anéis e cilindro de aço de baixa porcentagem de carbono.

3.2.3 Bronze

O bronze é uma liga metálica de cobre e estanho, podendo ter quantidades significativas de zinco e chumbo. A quantidade de estanho pode variar entre 2% a 10%, o estanho adicionado ao cobre tem o comportamento do aumento da dureza e a resistência mecânica, sem que ocorra a perda da ductilidade. O chumbo é inserido a liga para otimizar propriedades de antifricção, além de aumentar a usinabilidade. O zinco inserido a liga apresenta propriedades desoxidantes, além de aumentar a resistência mecânica (CHIAVERINI, 1986).

De acordo com a Termomecânica (2016), o bronze TM23 apresenta em sua composição 73% de cobre, 4% de estanho, 8% de zinco e 15% de chumbo. Esta liga apresenta grande resistência à corrosão, além de apresentar o menor custo entre todas a ligas de bronze vendidas comercialmente.

O bronze escolhido foi TM23, através de ensaios realizados com um campo magnético externo sendo aplicado, foi constatado que esse material apresenta propriedades antiferromagnéticas, assim não há interferência nas propriedades magnéticas dos ímãs permanentes.

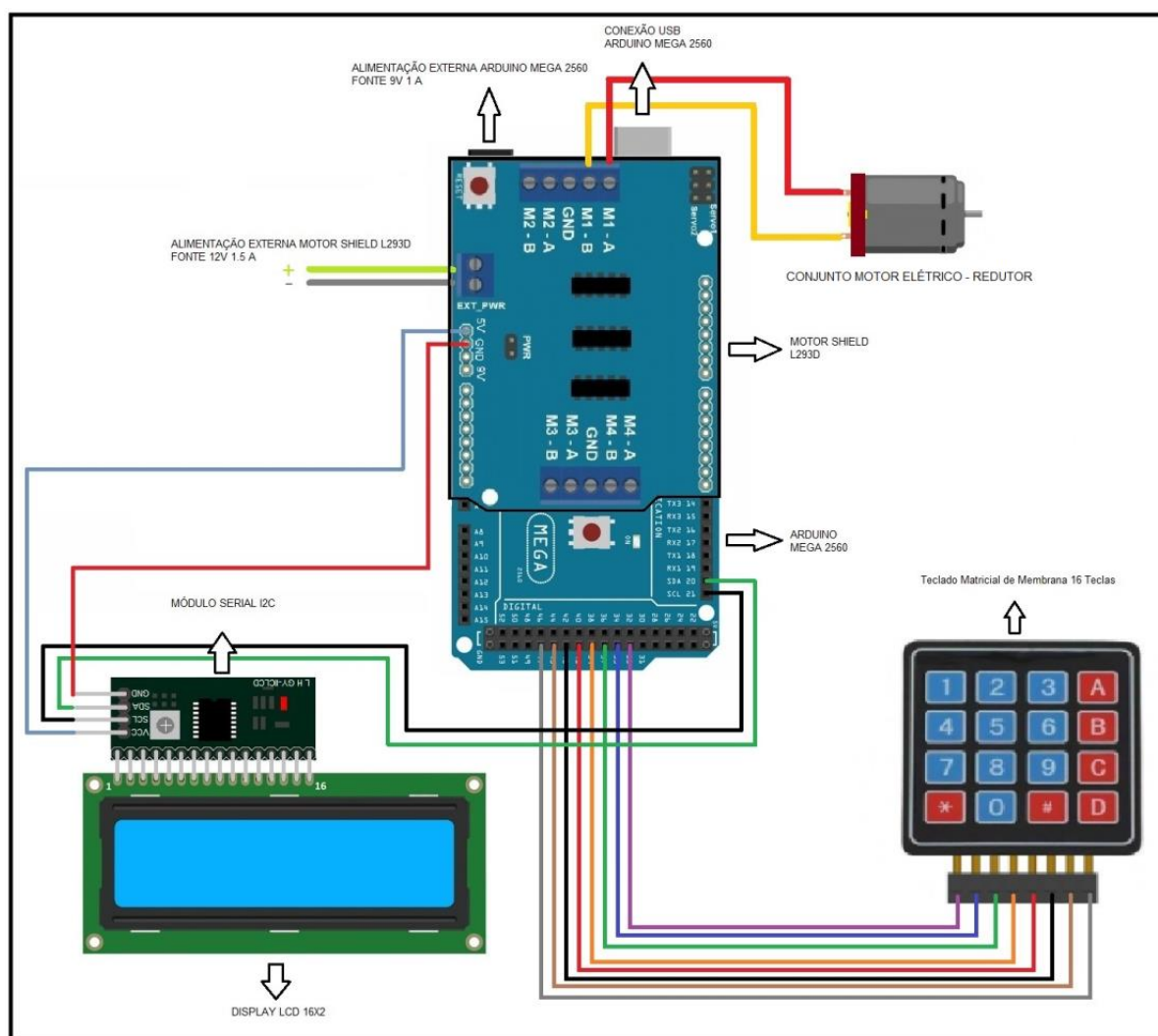
Foram usinados anéis externos e internos de bronze TM23 em diversas combinações de ensaios (tópico 3.5), para receber uma ventosa e os ímãs permanentes mais externos, e para preencher espaços entre os ímãs permanentes internos.

3.3 COMPONENTES ELÉTRICOS - ELETRÔNICOS

Para o controle de todos os componentes eletrônicos, foi utilizado um microcontrolador acessível e de baixo custo que utiliza uma placa de prototipagem *open-source*, de plataforma do tipo Arduino modelo Mega 2560 que, através de um software, permite a programação de comandos para o microcontrolador.

A Figura 20 demonstra os componentes eletrônicos com as suas devidas ligações, itens necessários para se controlar o conjunto motor elétrico-redutor que é disposto abaixo da cúpula que, por sua vez, está fixado à base de teste. Através do movimento rotativo do conjunto motor elétrico-redutor, faz com que a amostra de óleo depositada sobre a lamínula sofra força centrífuga e gravitacional.

Figura 20 - Componentes eletrônicos e as devidas ligações.



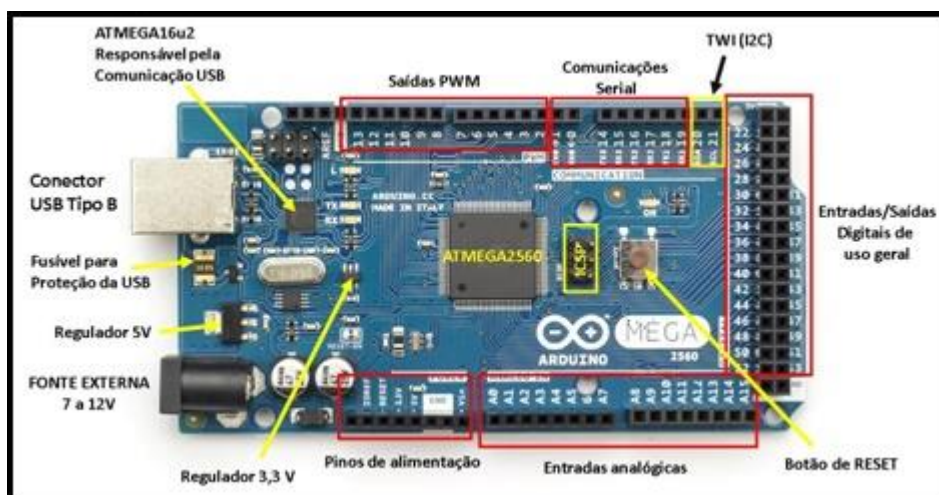
Fonte: Elaboração do próprio autor.

3.3.1 Arduino

Um artifício utilizado para controlar vários componentes eletro-eletrônicos é a utilização de Arduino. O Arduino é composto por diversas partes, dentre elas pode-se citar: microcontrolador, conector de alimentação, conector USB, conversor Serial-USB, pinos de alimentação e pinos de entrada e saída.

Devido à grande quantidade de portas analógicas e digitais utilizados pelo Motor Shield L293D Driver Ponte H (tópico 3.3.5), e o uso de oito portas digitais pelo teclado matricial de membrana, e também visando melhorias futuras do equipamento, foi selecionado o Arduino modelo Mega 2560. A Figura 21 apresenta o Arduino modelo Mega 2560.

Figura 21 - Arduino modelo Mega 2560.



Fonte: Embarcados (2016).

O conector de alimentação é encarregado de alimentar o Arduino com corrente elétrica através de uma fonte externa.

O conector USB tem a função de conectar o computador ao Arduino para ambos se comunicarem utilizando transferência de dados. Além da função descrita, o conector USB também pode ser uma alternativa para a alimentação do Arduino. Se o conector de alimentação e o conector USB estiverem conectados simultaneamente, e ambos alimentando o Arduino com corrente elétrica, este automaticamente dará prioridade para a alimentação do conector de alimentação. Mesmo com o conector de alimentação fornecendo corrente elétrica ao Arduino, pode haver transferência de dados via conector USB.

O conversor Serial-USB é um chip que tem a função de traduzir os dados transmitidos do computador para o Arduino e vice-versa. O computador converte os dados em corrente

elétrica via USB e a corrente elétrica é transmitida através de um cabo pelo conector USB do computador e do Arduino. Portanto, o conversor Serial-USB converte os dados em corrente elétrica e vice-versa. Quando há transferência de dados entre o computador e o Arduino os LED's TX e RX se acendem.

Pinos de alimentação têm a função de alimentar certos componentes quando são adicionados ao Arduino que necessitam de corrente elétrica para funcionar.

Os pinos de entrada e saída são compostos por saídas PWM, comunicação serial, I2C, entradas analógicas e entradas e/ou saídas digitais.

As saídas PWM, são saídas de dados analógicos. As saídas e as entradas analógicas de dados se dão por picos de corrente elétrica. Os picos de corrente elétrica por sua vez são traduzidos em forma de sinal digital e vice-versa, e processados pelo Arduino. A comunicação PWM se dá pela geração de corrente elétrica em forma de ondas quadradas e de alta frequência, enquanto que nas entradas de dados analógicos a corrente elétrica tem forma de ondas senoidais.

Os pinos de comunicação serial têm como característica a transferência de entrada e saída de um bit por vez em forma sequencial. Enquanto que nas demais entradas e/ou saídas digitais os bits de entrada e saída são transferidos paralelamente.

Os pinos I2C utilizam dados seriais pelas portas SDA e SCL. O pino SDA transfere dados analógicos entre o Arduino e o componente utilizado, enquanto o pino SCL é utilizado para a temporização entre os dois dispositivos interligados, para garantir a transferência de dados feita pela porta SDA. Módulos I2C são muito utilizados para a redução de portas utilizadas pelos componentes externos ao Arduino (MARGOLIS, 2011).

O Arduino possui um microcontrolador modelo ATmega2660. Esse microcontrolador além de processar dados de entrada e de saída, contém memórias EEPROM, SRAM e Flash.

A memória EEPROM, é utilizada para armazenar informações de longos termos (ARDUINO, 2016^a).

A memória Flash também é um EEPROM moderno, porém tem como função o armazenamento de dados em forma de bits de forma rápida, quando a sua fonte de energia é cessada não há perda de dados. O algoritmo é convertido pelo Conversor Serial-USB, em forma de bits, e é armazenado na memória Flash (ARDUINO, 2016^a).

A memória SRAM, faz com que o algoritmo armazenado na memória Flash crie e manipule variáveis quando é executado pelo microcontrolador (ARDUINO, 2016^a).

3.3.2 Teclado

O teclado é um dispositivo periférico que permite a entrada de dados e/ou funções por meio de teclas. Para o projeto foi adotado um teclado matricial de membrana de 16 teclas, para simplificar as ligações, e para que não necessite utilizar outros recursos complexos, como por exemplo o uso de *protoboards*, resistores e teclas avulsas. Devido à quantidade maior de teclas do teclado matricial, permite melhorias futuras ao equipamento.

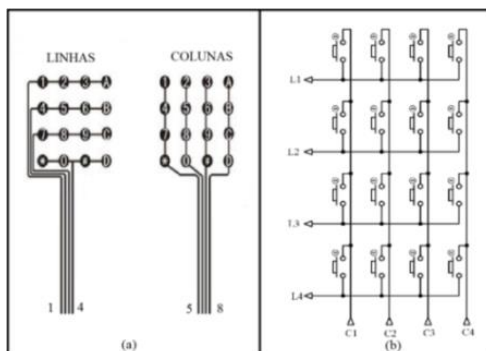
Como pode ser visto na Figura 22, o teclado requer a utilização de 8 portas digitais do Arduino, por questão de ergonomia foram escolhidas as portas 33, 35, 37, 39, 41, 43, 45 e 47, a ligação entre o teclado matricial e as portas do Arduino foi feita através de fios (jumpers macho-macho). As teclas "A", "B", "C", "D", "1" e "2" foram destinadas à rotação do motor elétrico e a tecla "*" foi destinada para à pausa da rotação do motor elétrico.

Com base no RPD convencional foram adotadas as mesmas rotações de trabalho. O conjunto motor elétrico-redutor irá operar em sentido anti-horário de rotação. Para a tecla "A" o motor trabalhará em uma rotação de 70 RPM, na tecla "B" em 100 RPM, na tecla "C" em 130 RPM e a tecla "D" em 200 RPM.

As teclas "1" e "2", foram dispostas para que em alguma ocasião o motor elétrico e a cúpula sejam desemperrados, ambas as teclas apresentam a mesma rotação de 230 RPM, porém na tecla "1" o motor elétrico é rotacionado em sentido anti-horário, e na tecla "2" o motor elétrico é rotacionado em sentido horário.

No teclado matricial as teclas são organizadas em linhas e colunas, conforme a Figura 22 (a). Quando alguma tecla é pressionada a linha com a coluna correspondente é acionada através de chaves contadoras, conforme a Figura 22 (b). Portanto, quando alguma tecla é pressionada uma comutação elétrica ocorre, e essa comutação elétrica é transformada em bits. Estes bits são enviados ao Arduino.

Figura 22 - Disposição de linhas e colunas do teclado matricial de membrana.



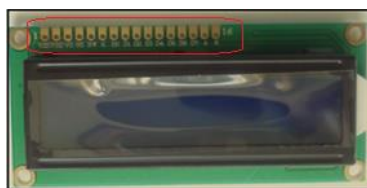
Fonte: Elaboração do próprio autor.

3.3.3 Display

Foi utilizado um display LCD 16x2 marca RUIITE, modelo RT162-7, onde os caracteres podem ser dispostos em uma ou duas linhas dependendo da programação, e cada linha possui um limite de dezesseis caracteres. O display tem a função de projeto, informar visualmente a rotação de trabalho do motor elétrico, que é selecionado pelo usuário através do teclado matricial de membrana.

Como pode ser visto na Figura 23, o display requer a utilização de dezesseis portas no Arduino. Foi realizada uma árdua pesquisa, para otimizar a quantidade de portas utilizadas no Arduino modelo Mega 2560, consequentemente, simplificar as ligações, para que não necessite utilizar outros recursos complexos, como por exemplo, o uso de *protoboards*. Foi encontrado e adquirido um módulo serial I2C modelo GY-IICLCD, que reduz drasticamente a quantidade de portas (para quatro), como visto na Figura 20.

Figura 23 - Display LCD 16x2 RT162-7.

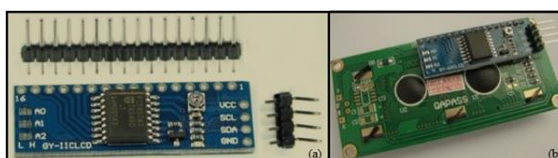


Fonte: Elaboração do próprio autor.

Verificou-se a necessidade de soldar a extremidade menor de uma barra de pinos 1x16 180° na parte superior ao módulo serial I2C. Na parte direita ao módulo I2C, também foi necessário soldar a menor extremidade de uma barra de pinos 1x4 90°, conforme ilustrado na Figura 24 (a), ambas as barras possuem espaçamento padrão de 2,54 mm.

Para conectar o módulo serial I2C ao display foi realizada outra solda na extremidade maior da barra de pinos 1x16 180°, como pode ser visto na Figura 24 (b). A extremidade maior do pino lateral 1x4 90°, é utilizada para conectar o módulo serial I2C com o Arduino Mega 2560 através de fios (jumpers macho-fêmea).

Figura 24 - Módulo Serial I2C.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

3.3.3.1 Solda eletrônica

As soldas eletrônicas devem unir componentes eletrônicos sem que haja alterações na estrutura cristalina, assim, a mudança da estrutura cristalina pode comprometer a funcionalidade de tal componente. Para isso são realizadas soldas brandas em componentes eletrônicos (SUGANUMA, 2001; ARANHA NETO, 2011).

Soldas brandas, são soldas quem têm o objetivo de unir peças de cobre, bronze e latão. Apresentam como metal de adição ligas de estanho e chumbo a qualquer proporção, geralmente, de 20% a 98% de estanho (ARANHA NETO, 2011).

As ligas de estanho e chumbo apresentam um sistema eutético, ou seja, se funde com facilidade, onde o estanho é o solvente β e o chumbo o soluto α , no diagrama de fases estanho-chumbo (CALLISTER, 2000).

As ligas de estanho e chumbo como metal de adição para solda, além de apresentar baixa temperatura de fusão, têm como atributo a boa fluidez, ou seja, preenche facilmente os espaços vazios a serem soldados. Outra característica das ligas de estanho, é o baixo custo comercial, devido à alta disponibilidade (SUGANUMA, 2001).

As soldas brandas utilizadas neste trabalho, foram realizadas manualmente através do Ferro de Soldar Hikari Plus SC-30 25W. O metal de adição para a realização da solda branda foi a liga Sn63/Pb37, com diâmetro de 1 mm da marca Solda Best. Como pode ser visto na Tabela 9, a liga Sn63/Pb37, ou seja, 63% de estanho e 37% chumbo apresenta o ponto de fusão a uma temperatura de 183°C.

Tabela 9 - Ligas de estanho e chumbo e aplicações.

COMPOSIÇÕES QUÍMICAS			
Liga Sn/Pb	Massa Específica (g/cm ³)	Intervalo de Fusão	Aplicação
20 / 80	10,20	183 a 280 °C	Soldagens por imersão
25 / 75	10,00	183 a 267 °C	Soldagens por imersão, maçarico ou ferro de soldar
30 / 70	9,70	183 a 255 °C	Soldagem de radiadores de automóveis, calhas, terminais e cabos elétricos
40 / 60	9,30	183 a 235 °C	Trocados de calor, calhas e motores elétricos
50 / 50	8,90	183 a 212 °C	Manutenção elétrica, tubulações e conexões de cobre, terminais elétricos
60 / 40	8,60	183 a 189 °C	Soldagem com ferro de soldar, circuitos impressos, componentes eletrônicos
63 / 37	8,40	183 °C	Eletroeletrônica, soldagem por onda em máquinas automáticas, por imersão e ferro de soldar

Fonte: Aranha Neto (2011).

3.3.3.2 Funcionamento do display

O display adotado possui no total de 32 caracteres. Cada caractere do display é composto por 40 matrizes, denominados de pixel, e estas matrizes são dispostas em 8 linhas e 5 colunas. Dentro de cada pixel há um cristal líquido, que em sua forma natural é transparente (cristais alinhados), porém quando há passagem de corrente elétrica no pixel, os cristais ficam desalinhados, bloqueando assim, a passagem de luz emitida através do LED que é disposto atrás dos caracteres (MARGOLIS, 2011).

O Arduino envia dados analógicos através das portas SDA e SCL, para o módulo serial I2C, e o mesmo faz com que traduza esses dados analógicos para os demais pinos do display.

Fios (jumpers macho-fêmea) foram utilizados para conectar o módulo serial I2C ao Arduino e ao Motor Shield. As portas VCC e GND do módulo serial I2C foram ligadas as portas 5V e GND respectivamente do Motor Shield. As portas SDA e SCL do módulo serial I2C foram ligadas as portas 20 e 21 respectivamente do Arduino. Todas as ligações são demonstradas na Figura 20.

3.3.4 Seleção do conjunto motor elétrico redutor

Motores de corrente contínua apresentam alta rotação e baixo torque, sendo necessária uma caixa de redução para que se possa reduzir a rotação adequada ao projeto e, conseqüentemente, ampliar o torque consideravelmente.

Foram realizados cálculos necessários para a seleção do conjunto motor elétrico redutor, os cálculos são apresentados no Apêndice B no tópico B.5.

Através dos cálculos realizados, foi adotado o motor elétrico de corrente contínua de ímã permanente com escovas, acoplado em caixa de redução marca Akiyama Motors, modelo AK280/1.1PF5R193SC, conforme a Figura 25.

Figura 25 - Conjunto motor elétrico-redutor adotado.



Fonte: Neoyama (2016).

3.3.5 Motor shield

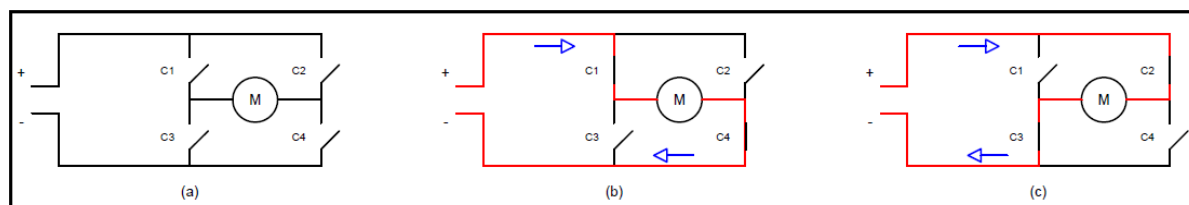
De acordo com o site oficial da Arduino (2016^b), "shields são placas que podem ser conectadas em cima do Arduino estendendo suas capacidades".

Através de diversas pesquisas, optou-se por utilizar um dispositivo que, através do Arduino, controlasse a velocidade e o sentido de rotação do motor elétrico. O dispositivo escolhido foi o Motor Shield L293D Driver Ponte H, como ilustrado na Figura 20, conectado ao Arduino. Esta shield foi adotada por permitir melhorias futuras ao projeto, utilizando adição de outros motores elétricos.

De acordo com Falcone (2011), os motores elétricos de corrente contínua apresentam a reversibilidade de rotação se a alimentação de corrente elétrica for invertida.

Um artifício usual descrito por Braga e Barbi (2000) para que se possa inverter o sentido de corrente elétrica, é o uso do circuito elétrico de ponte H, apresentado na Figura 26 (a). Se as chaves contadoras C1 e C4 forem fechadas o motor irá rotacionar em sentido horário, como observado na Figura 26 (b). Porém, se as chaves contadoras C2 e C3 estiverem fechadas o sentido da corrente elétrica é invertido e o motor elétrico é rotacionado em sentido anti-horário, conforme a Figura 26 (c).

Figura 26 - Circuito elétrico de Ponte H.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

O Arduino fornece uma alimentação de 5V e 40 mA ao Motor Shield que, por sua vez, é repassada aos canais de alimentação da Motor Shield. Para tal afirmação, foram realizadas mensurações de corrente e tensão através de um multímetro. Como o motor elétrico necessita de uma alimentação máxima de 12 V e 1,44 A, foi adquirida uma fonte de alimentação externa de 12 V e 1,5 A bivolt.

Cada chip L293D de ponte H necessita de consumo de corrente de 0,6 A, embora suporte até 1,2 A, porém, não é recomendado. Para obter alimentação externa, além das ligações mostradas na Figura 20, é necessário retirar o jumper PWR (power).

Houve necessidade de correlacionar a rotação de programação e a rotação do eixo do conjunto motor-redutor. Para aferir a rotação de projeto foi adquirido um tacômetro marca Nicetu, modelo TC802. A rotação do conjunto motor elétrico-redutor está correlacionada com a tensão, e essa grandeza foi mensurada pelo multímetro marca Minipa, modelo ET-1100.

A Tabela 10, apresenta uma relação entre velocidade de programação, tensão de alimentação do motor e rotação do eixo motor-redutor. Na tabela está representada a média de dez mensurações de tensão e rotação.

Tabela 10 - Relação entre velocidade de programação, tensão e rotação.

Tensão X Rotação			
Tecla Acionamento	Velocidade Máxima de Programação motor.setSpeed()	Tensão (Volts)	Rotação (RPM)
"A"	78	2,221	69,9
"B"	111	3,173	100,1
"C"	144	4,127	130,1
"D"	221	6,349	200,1
"*"	0	0	0
"1"	255	7,302	230,1
"2"	255	7,302	230,1

Fonte: Elaboração do próprio autor.

3.3.5.1 Programação

A programação do projeto foi realizada no *software* Arduino 1.0.6, este *software* é desenvolvido em plataforma Java. O *software* tem como função traduzir o algoritmo realizado no computador em forma de dados para serem transferidos ao Arduino.

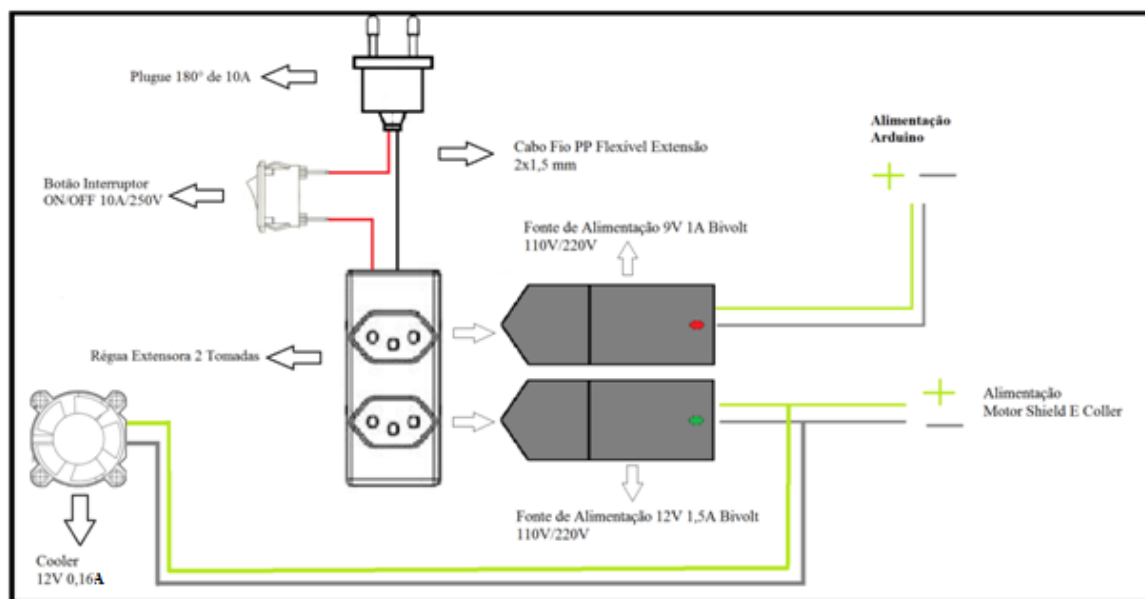
O *software* Arduino 1.0.6, permite que o algoritmo (comumente denominado de steck) seja escrito em linguagem C++ (ARDUINO, 2016 °).

O Apêndice C, demonstra o algoritmo realizado e comentado para o projeto em linguagem C++, no *software* Arduino 1.0.6.

3.3.6 Ligação elétrica

A Figura 27 representa as ligações elétricas do projeto para fornecer alimentação para todo conjunto eletrônico.

Figura 27 - Ligações elétricas.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Segundo a Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica (ABRADEE), o Brasil apresenta tensões elétricas secundárias de 110 V a 220 V, ciente deste fato foram adotadas duas fontes de alimentação bivolt automática. Os ensaios do equipamento desenvolvido foram realizados nos estados de Goiás (220 V) e São Paulo (127 V).

Para alimentar o Arduino foi escolhida uma fonte de alimentação externa de 9 V e 1 A modelo KDL-121000. O Arduino Mega suporta tensões de entrada de 7 a 12 V, e um consumo de corrente elétrica de 0,5 A, assim, a fonte de alimentação se apresenta mais do que suficiente para o bom funcionamento do Arduino.

O consumo de corrente pelo cooler é de 0,16 A. A Motor Shield, possui 4 pontes H e cada ponte necessita de consumo de corrente de 0,6 A. Como o projeto utiliza somente uma ponte, portanto a fonte de alimentação adotada de 12 V e 1,5 A, modelo ZWB-1868, é mais do que suficiente para o bom funcionamento do cooler e da Motor Shield.

Através de ligações externas, a fonte de 12 V e 1,5 A, suportaria a alimentação do Arduino, da Motor Shield e do cooler, mas visando futuras melhorias ao projeto, foi adotada uma fonte somente para alimentação do Arduino, e outra fonte de alimentação somente para o cooler e da Motor Shield. Vale ressaltar que a fonte de alimentação 12 V e 1,5 A, suporta a alimentação de mais uma ponte.

Para alimentar as fontes foi adotada uma régua extensora de duas tomadas, que segue a norma NBR 14146, suportando um limite de tensão de entrada de 230 V e corrente máxima de 10 A. Para ligar a régua extensora à tomada de energia foi utilizado cabo PP flexível fio

2x1,5 mm com 1,5 m de comprimento e um plugue macho 180° de 10 A, ambos respeitando a norma NBR 14146.

Foi instalado um botão interruptor ON/OFF no cabo PP flexível fio 2x1,5 mm, representado na Figura 27, por motivos de segurança.

3.3.6.1 Alojamento dos componentes elétricos e eletrônicos

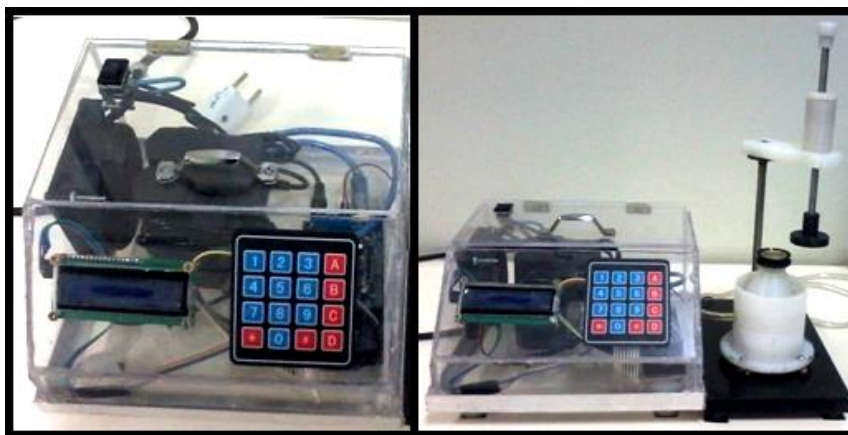
Foram realizadas pesquisas sobre quais tipos de materiais que poderiam ser utilizados para confeccionar um case, para alojar todos os componentes elétricos e eletrônicos do projeto.

Verificou-se que polimetilmetacrilato, chamando popularmente de acrílico, ou também de PMMA, seria uma boa escolha, pois apresenta boa resistência as intempéries, propriedades mecânicas regulares, baixíssima condutividade elétrica, além do preço acessível. Quando peças de polimetilmetacrilato são fraturados, apresenta baixa fragmentação (CALLISTER, 2000).

Foram adquiridas chapas de polimetilmetacrilato com espessura de 4 mm, as chapas foram cortadas e furadas conforme o Apêndice A. Todas as chapas cortadas, com exceção da tampa superior, foram unidas com adesivo a base de cianoacrilato, TEKBOND 793.

Com a necessidade de acesso interno ao case, como por exemplo para conectar o Arduino ao computador para programação, manutenção e/ou substituição de algum componente interno, realizou-se instalação de duas dobradiças metálicas 40x40 e um puxador metálico na tampa superior do case, tendo assim, uma tampa móvel, como pode ser visto na Figura 28.

Figura 28 - Case de polimetilmetacrilato.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

3.4 USINAGEM DE PEÇAS

Usinagem é uma operação que confere a uma peça a forma, dimensão ou acabamento, ou uma combinação destes três itens, através da remoção de material em forma de cavaco (FERRARESI, 1969).

Para Diniz, Marcondes, e Coppini, (2013) e Ferraresi (1969) a usinabilidade de um material pode ser entendida como o grau de resistência de usinar um material, e que as propriedades de usinagem de um material são aquelas que interferem diretamente na vida da ferramenta, no acabamento da peça, nos esforços e na temperatura de corte, na produtividade e nas características do cavaco. A usinabilidade de um material depende da dureza, das propriedades mecânicas, da composição química e possível encruamento da granulação do material.

Todas as peças do projeto foram confeccionadas por processos convencionais de usinagem.

3.4.1 Usinagem de peças poliméricas

De acordo com Crawford (1998), os plásticos de engenharia oferecem vantagens em relação a outros materiais em algumas propriedades específicas, tais como: baixa densidade, alta resiliência (capacidade de um material absorver energia mecânica em regime elástico), resistência à corrosão, facilidade de processamento, entre outros. Por outro lado, sua aplicação torna-se limitada quando se necessita de propriedades mecânicas, tais como rigidez ou resistência térmica.

Devido as características do material citado no 3.2.1, foi adotado a poliamida 6 (PA 6). As ferramentas de corte utilizadas para a usinagem dos componentes poliméricos do projeto foram ferramentas inteiriças denominados de bits e brocas de aço rápido.

Os bits utilizados são constituídos de uma liga composta por 50% de cobalto, 35% de cromo e 15% de tungstênio, as bitolas utilizadas foram 3/8"x4" e 5/16"x4" ambos com ângulos de afiação de 60°. As brocas utilizadas são de aço rápido helicoidais com corte à direita, seguindo a norma ANSI B 94 11 M, com ângulo de afiação de 118°.

Vanat e Braghini Junior (2014) afirmam que no mercado de ferramentas de corte não se encontra uma ferramenta destinada especificamente para usinagem de polímeros. Segundo o autor, a maior dificuldade está no controle dos cavacos gerados durante a usinagem. As ferramentas de corte disponíveis são em geral destinadas apenas para usinagem de metais. No

entanto o princípio da usinagem de polímeros não é diferente da usinagem realizada em metais e suas ligas.

Um fato interessante observado durante o processo de usinagem da poliamida 6, foi a formação de cavacos muito longos. Para evitar esse problema e consequentemente melhorar o acabamento superficial, utilizou-se pequenos avanços ($0,5 \text{ mm/rot}$) e alta velocidade de corte (800 RPM).

Foi utilizado fluido de corte refrigerante nos processos de usinagem das peças de poliamida 6, devido ao material estar na classe dos termoplásticos, o mesmo pode apresentar alta temperatura em atrito com as ferramentas de corte, podendo acarretar deformações permanentes à peça usinada.

O objetivo dos fluidos de corte refrigerantes, é reduzir os efeitos da temperatura durante o processo de usinagem, devido ao atrito entre a ferramenta de corte e o material usinado, assim prolongando a vida útil da ferramenta. Fluidos de corte refrigerantes são indicados para ferramentas feitas de aço rápido (GROOVER, 2014).

3.4.2 Usinagem de peças metálicas

Materiais de alta dureza pode dificultar a usinabilidade, porém baixa dureza também pode dificultar o processo de usinagem, podendo formar longos cavacos dúcteis. Para solucionar este problema de cavacos muito longos, deve-se utilizar mecanismos para quebrá-lo (CHIAVERINI, 1986).

De acordo com Termomecânica (2016) e Aços Vic (2016), tanto o aço SAE 1020 (diâmetro de 19 mm) selecionado quanto o bronze TM23 (diâmetro de 25 mm) adquiridos são trefilados.

A trefilação é um processo de conformação mecânica a frio ou a quente. A trefilação a frio acarreta o encruamento dos grãos do material, assim, alterando as propriedades mecânicas do material, reduzindo a ductilidade e aumentando a resistência mecânica. É comum a trefilação de barras como matéria-prima para usinagem, pois a trefilação melhora a usinabilidade de certos metais (GROOVER, 2014).

Aços com baixa quantidade de carbono de até 0,20%, apresentam boa usinabilidade no estado encruado (CHIAVERINI, 1986).

O bronze TM23 apresenta baixa dureza de 75 na escala Brinell, o aço 1020 apresenta uma dureza de 90 na escala Brinell, conferindo assim boa usinabilidade a ambos materiais (TERMOMECÂNICA, 2016; AÇOS VIC, 2016).

Para formar a combinação distinta apresentada no tópico 3.5.1, foi necessário recorrer ao processo de usinagem para obter os anéis e o cilindro de aço SAE 1020.

Como mencionado anteriormente a haste de movimentação e a haste de fixação são de aço SAE 1020. Para a aplicação do projeto, essas duas peças não irão sofrer grandes solicitações de esforços (como apresentado no Apêndice B), devido a este fato, parte da barra adquirida pode ser reduzida de 19 *mm* de diâmetro para 6,35 e 6,5 *mm* de diâmetro respectivamente, através do processo de usinagem.

Como dito anteriormente, foram usinados anéis externos e internos de bronze TM23 de todas as combinações (tópico 3.5.1), sob a medida de diâmetro externo de 23,5 *mm* para receber uma ventosa e os ímãs permanentes mais externos, e para preencher espaços entre os ímãs permanentes internos.

As ferramentas de corte utilizadas para a usinagem dos componentes metálicos foram o inserto e brocas de aço rápido.

O inserto utilizado foi o TNMG 160408-PF triangular de 60° acoplado mecanicamente à porta ferramenta. As brocas utilizadas são de aço rápido helicoidais com corte à direita, seguindo a norma ANSI B 94 11 M, corte à direita, com ângulo de afiação de 118°.

Foi observado que durante o processo de usinagem do bronze TM23 e do aço SAE 1020, utilizado pequenos avanços (0,1 *mm/rot*) e alta velocidade de corte (750 RPM), a superfície apresentou bons acabamentos, havendo formação de cavacos descontínuos.

Também foram utilizados fluido de corte refrigerantes nos processos de usinagem das peças metálicas, devido a ambos os materiais apresentarem pequenas dimensões, a alta temperatura em atrito com as ferramentas de corte, poderia deformá-los permanentemente.

3.5 ÍMÃS UTILIZADOS PARA ENSAIOS

Verificando visualmente é difícil constatar de qual tipo de ímã o separador de partículas rotativo convencional (RPD) é constituído.

De acordo com Groover (2014), processos de fabricação por sinterização são indicados para médias e grandes produções seriadas, pois os custos de equipamentos e de ferramentas são elevados, pós metálicos apresentam custo alto, fora as dificuldades em se manusear os pós metálicos. Um estudo sobre custos de terras raras, apresentado por Rocio et. al. (2012) comprova o alto custo do neodímio e principalmente do samário. Fundamentada com estas afirmações, e com base no trabalho de Chiou (1991), surgiu a idéia de utilizar ímãs permanentes vendidos comercialmente, e assim testar várias combinações de diferentes ímãs.

Assim foram adquiridos ímãs de NdFeB N35, N42 e N45, pois foram os únicos ímãs em que as medidas se adequaram ao projeto (devido às lamínulas apresentarem medidas de 36x36 mm). Também foi adquirido um ímã de ferrite anisotrópico, afim de testar uma combinação distinta, comparando essa combinação com o ímã de NdFeB. A Tabela 11, demonstra os ímãs que foram adotados para a realização dos ensaios com as suas respectivas medidas.

Não foram utilizados ímãs feitos de SmCo, pois os mesmos são comercializados somente em forma cilíndrica (diâmetros superiores a 50 mm) ou retangulares, impossibilitando o seu uso ao projeto desenvolvido. Além do mais, Callister (2000) afirma que as coercividades e os produtos de energia entre os ímãs de NdFeB e SmCo são bem próximas.

Também não foram adotados ímãs de AlNiCo, uma vez que são comercializados somente em formas cilíndricas (diâmetros de 10 mm e altura acima de 150 mm), formas retangulares e em formas de ferraduras.

Tabela 11 - Ímãs adquiridos para os ensaios.

Ímãs adquiridos para os ensaios				
Nº	Item	Medidas (mm)	Unidades	Quantidade
1	Ímã N35 Níquel Anel	Øext 19 x Øint 14 x h 10	2	1
2	Ímã N35 Níquel Anel	Øext 9 x Øint 3 x h 10	2	1
3	Ímã N42 Níquel Cilindro	Ø 6 x h 15	2	1
4	Ímã N45 Níquel Anel	Øext 12 x Øint 9 x h 1,5	10	1
5	Ímã N45 Níquel Cilindro	Ø 3 x 1,5	10	1
6	Ímã N35 Níquel Cilindro	Ø 16 x h 5	5	1
7	Ímã de Ferrite Anisotrópico Cilindro	Ø 16 x h 5	10	1

Legenda:

Øext - Diâmetro externo; Øint - Diâmetro interno; Ø - Diâmetro; h - Altura.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

De acordo com Grupo Super Ímãs (2016), os ímãs de neodímio e de ferrite apresentam magnetização diametral, para testar a veracidade dos dados, verificou-se a polarização através do Gaussímetro adquirido.

Os ímãs adquiridos apresentam uma camada protetora de níquel contra oxidação. A letra "N" representa ímãs de neodímio. O número posterior à letra N significa grades magnéticas comerciais, ou seja, quanto maior o número maior será o máximo produto energético, maior também será o custo, por exemplo a grade N45 apresenta máximo produto energético entorno

de 20% maior do que a grade N35. As grades magnéticas comerciais mais comuns são: N35, N38, N40, N42 e N45 (Grupo Super Ímãs, 2016).

A Tabela 12 demonstra as características dos ímãs adquiridos para os ensaios.

Tabela 12 - Características dos ímãs adquiridos para ensaios.

Ímã	Máx. Produto Energia	Remanência	Força Coerciva	Força Coerciva Intrínseca	Máx. Temp. Trabalho
	(BH) máx kJ/m ³ (MGOe)	Br mT(KG)	Hcb KA/m (KG)	Hci KA/m (KOe)	Tw °C
Grade N35	263 - 287 (33 - 36)	1170 - 1220 (11.7 - 12.2)	≥ 868 (≥ 10.9)	≥ 955 (≥ 12)	≤80
Grade N42	318 - 342 (40 - 43)	1280 - 1320 (12.8 - 13.2)	≥ 915 (≥ 11.5)	≥ 955 (≥ 12)	≤80
Grade N45	342 - 366 (43 - 46)	1320 - 1380 (13.2 - 13.8)	≥ 923 (≥ 11.6)	≥ 955 (≥ 12)	≤80
Ferrite Anisotrópico 5	27,1 (3,4)	3800 (3.8 - 6.5)	2400	2500	≤250

Fonte: Grupo Super Ímãs (2016).

3.5.1 Combinações para ensaios

Foram montadas combinações de ímãs, anéis e cilindros de bronze, anéis e cilindros de aço descritos e numeradas nas Tabelas 13 a 17, sendo todas as peças representadas e numeradas na Figura 29.

As Combinações de 1, 2 e 5, contam com ímãs de neodímio e com peças de bronze TM23. As peças de bronze têm a função de separar os campos magnéticos gerados entre os ímãs de neodímio, como dito anteriormente no tópico 2.7 e justificado no item 3.2.3, o bronze TM23 é um material antiferromagnético.

Tabela 13 - Ímãs utilizados na combinação 01.

Combinação 01			
Nº	Item	Medidas (mm)	Unidades
1	Bronze TM23 Anel	Øext 23,5 x Øint 19 x h 10	1
2	Ímã de Neodímio N35 Níquel Anel	Øext 19 x Øint 14 x h 10	1
3	Bronze TM23 Anel	Øext 14 x Øint 9 x h 10	1
4	Ímã de Neodímio N35 Níquel Anel	Øext 9 x Øint 3 x h 10	1
5	Bronze TM23 Cilindro	Ø 3 x h 10	1

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 14 - Ímãs utilizados na combinação 02.

Combinação 02			
Nº	Item	Medidas (mm)	Unidades
1	Bronze TM23 Anel	Øext 23,5 x Øint 19 x h 10	1
2	Ímã de Neodímio N35 Níquel Anel	Øext 19 x Øint 14 x h 10	1
3	Bronze TM23 Anel	Øext 14 x Øint 6 x h 10	1
4	Ímã de Neodímio N42 Níquel Cilindro	Ø 6 x h 10	1

Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Combinação 03, é um pouco diferente das demais, como descrito no tópico 2.7 e 3.2.3, o aço 1020 é um material ferromagnético. Sobre o ímã de ferrite anisótropico foram dispostas as duas peças de aço, para que as peças de aço conduzam campos magnéticos circulares menores, os campos magnéticos circulares entre as peças de aço 1020 são separados através das peças de bronze TM23.

Tabela 15 - Ímãs utilizados na combinação 03.

Combinação 03			
Nº	Item	Medidas (mm)	Unidades
1	Ímã de Ferrite Anisótropico Disco	Ø 16 x h 5	1
2	Bronze TM23 Anel	Øext 23,5 x Øint 16 x h 6,5	1
3	Aço 1020 Anel	Øext 16 x Øint 12,5 x h 1,5	1
4	Bronze TM23 Anel	Øext 12,5 x Øint 8 x h 1,5	1
5	Aço 1020 Cilindro	Ø 8 x h 1,5	1

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Assim como a Combinação 03, na Combinação 04 as peças de aço e de bronze foram dispostas sobre o ímã de neodímio N35, afim de que se possa fazer uma comparação entre a Combinação 03 e 04.

Tabela 16 - Ímãs utilizados na combinação 04.

Combinação 04			
Nº	Item	Medidas (mm)	Unidades
1	Ímã de Neodímio N35 Níquel Disco	Ø 16 x h 5	1
2	Bronze TM23 Anel	Øext 23,5 x Øint 16 x h 6,5	1
3	Aço 1020 Anel	Øext 16 x Øint 12,5 x h 1,5	1
4	Bronze TM23 Anel	Øext 12,5 x Øint 8 x h 1,5	1
5	Aço 1020 Cilindro	Ø 8 x h 1,5	1

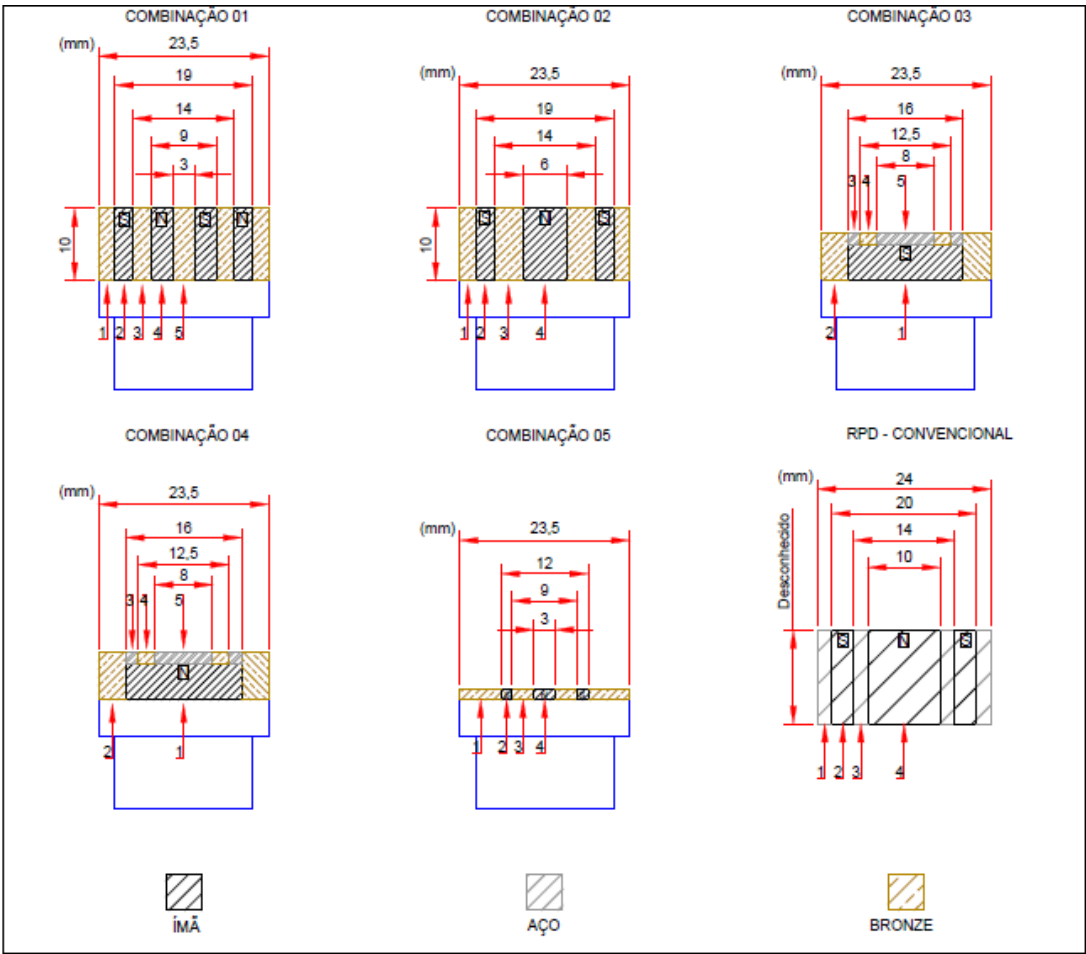
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 17 - Ímãs utilizados na combinação 05.

Combinação 05			
Nº	Item	Medidas (mm)	Unidades
1	Bronze TM23 Anel	Øext 23,5 x Øint 12 x h 1,5	1
2	Ímã de Neodímio N45 Níquel Anel	Øext 12 x Ø 9 x h 1,5	1
3	Bronze TM23 Anel	Øext 9 x Øint 3 x h 1,5	1
4	Ímã de Neodímio N35 Níquel Cilindro	Ø 3 x h 1,5	1

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 29 - Combinações utilizadas para os ensaios.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Cada combinação foi montada sobre a base de teste (item descrito no tópico 3.1.1). A adesão entre a base de teste e os ímãs se deu através de um adesivo a base de cianoacrilato TEKBOND 793. Não houve necessidade de colar os anéis usinados de bronze na ventosa adotada, pois esta se mostrou muito justa aos anéis de bronze. A Figura 30 ilustra uma combinação atrelada à ventosa sob a base de teste.

Figura 30 - Ventosa utilizada para fixar a lamínula.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

3.6 AMOSTRAS

Silva (2015) em seu trabalho construiu uma bancada experimental, com o objetivo de monitorar o desgaste no par engrenado em redutores, utilizou como parâmetro de monitoramento técnicas de análise de vibrações e análise de lubrificantes. A partir das especificações da potência utilizada sobre o par engrenado, foi selecionado o óleo lubrificante SAE 90, API GL-5, MIL-L-2105-D, da marca Texaco Gear Oil. No estudo foram coletadas três amostras, cada amostra teve o tempo de trabalho de 60, 120 e 180 horas respectivamente.

Para o presente trabalho, Silva (2015) forneceu parte dessas amostras para a confecção dos ferrogramas. A amostra de 60 horas de trabalho foi intitulada de número 07, a amostra de 120 horas de trabalho foi intitulada de número 27, e a amostra de 180 horas de trabalho foi intitulada de número 36.

3.7 METODOLOGIA DE TRABALHO

A confecção dos ferrogramas do presente trabalho seguiu a mesma metodologia de etapas descritas por Kittiwake (2004), apresentado no tópico 2.6.1. Para cada amostra de óleo foram confeccionados ferrogramas no equipamento convencional e no protótipo, utilizando as cinco combinações.

Para o aquecimento das amostras à 60 °C, foi utilizando um forno mufla marca EDG, modelo EDG10P-S 7000, como pode ser visto na Figura 31.

Figura 31 - Forno mufla utilizado.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Para a deposição do óleo lubrificante e do tetracloroetileno sobre a lamínula, foi utilizada uma pipeta dosadora de ponta descartável. Foram utilizadas quatro pontas, cada ponta foi rotulada para a devida amostra (demonstrado na Figura 32), para que não houvesse mistura entre amostras.

Figura 32 - Pipeta dosadora e respectivas pontas.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Os ferrogramas confeccionados foram analisados por um ferrosκόpio (microscópio óptico) da marca Olympus, modelo BX 41, demonstrado na Figura 33.

Figura 33 - Ferroscópio.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados e discussões dos ferrogramas obtidos. Em todas as combinações houve a formação de anéis concêntricos de partículas de desgaste sobre a lamínula como mostrado na Figura 34.

Figura 34 - Formação de partículas de desgaste sobre a lamínula.



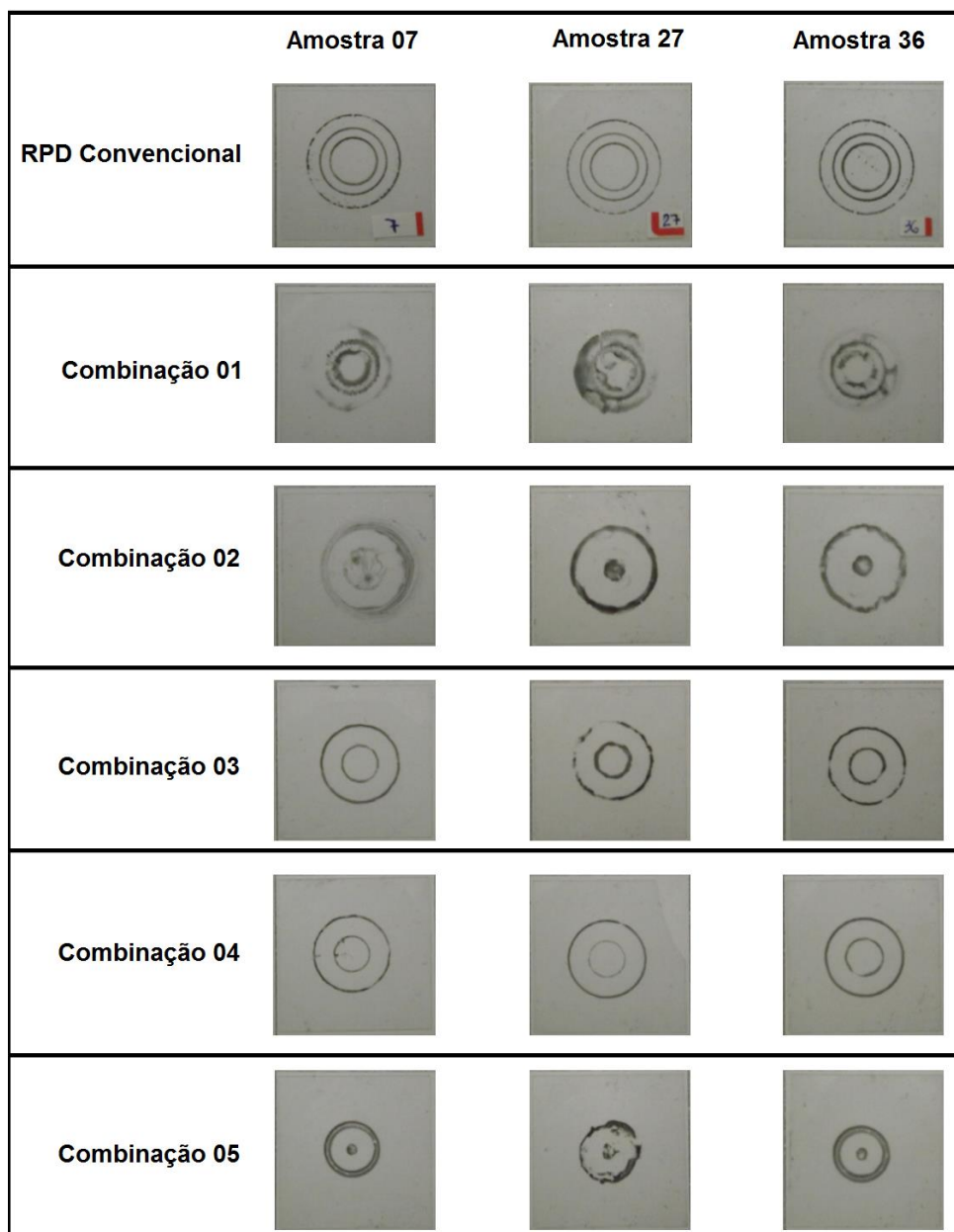
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Todos os ferrogramas obtidos com as respectivas amostras e combinações são demonstrados na Figura 35.

As três amostras de óleo lubrificante, apresentaram formação de três anéis concêntricos nos ferrogramas, utilizando o separador de partículas rotativo convencional. Portanto, as três amostras de óleo lubrificante apresentam partículas de desgaste da ordem de 1 à 200 μm .

Como pode ser observado na Figura 35, formaram-se três anéis concêntricos nos ferrogramas utilizando as combinações 01 e 05. Os ferrogramas usando a combinação 01, não apresentaram uma boa qualidade em relação ao RPD convencional. Já os ferrogramas utilizando a combinação 05, apresentaram boa qualidade quando comparando ao RPD convencional, os anéis externo e central ficaram bem próximos, devido ao fato que o ímã (anel de Neodímio N45) possui 3 mm de largura.

As combinações 02, 03 e 04 formaram-se dois anéis concêntricos sobre a lamínula. Os ferrogramas utilizando a combinação 02 não apresentaram uma boa qualidade em relação ao RPD convencional, porém, apresentaram qualidade superior em relação à combinação 01. Os ferrogramas utilizando a combinação 03 e 04 apresentaram boa qualidade quando comparados aos do separador de partículas rotativo convencional.

Figura 35 - Ferrogramas obtidos com as respectivas amostras e combinações.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Foi adquirido um Gaussímetro TLMP - HALL-10 para mensurar a densidade de fluxo magnético da superfície do RPD convencional e das combinações, com o intuito de compará-las. Como mencionado anteriormente, a densidade de fluxo magnético é a quantidade de vetores do campo magnético que atravessam uma superfície.

Através do Gaussímetro, foi constatado que o dispositivo convencional apresenta magnetização diametral. Magnetização diametral significa que o pólo norte está posicionado na face curva, e o pólo sul está na face curva oposta.

Nas Tabelas 13 a 17 estão descritas as numerações das peças e representadas na Figura 29. Foram realizadas dez leituras de densidade de fluxo magnético, sobre as superfícies dos ímãs concêntricos do dispositivo convencional e das combinações. A Tabela 18 demonstra a média das leituras realizadas.

Tabela 18 - Mensurações dos campos magnéticos das superfícies

Campo magnético de superfícies (Gauss)					
Nº	RPD Conv.	Pólo	Nº	Comb. 01	Pólo
3	1689,4	S	4	3020,7	S
1	1791,2	N	2	4549	N
Nº	Comb. 02	Pólo	Nº	Comb. 03	Pólo
4	4031,2	N	5	1221,4	S
2	3916,6	S	3	1309,2	S
Nº	Comb. 04	Pólo	Nº	Comb. 05	Pólo
5	1630	N	4	2131,2	N
3	2144,2	N	2	2509,7	S

Fonte: Elaboração do próprio autor

As típicas partículas de desgaste que são encontradas em ferrografias, são apresentadas no Anexo A.

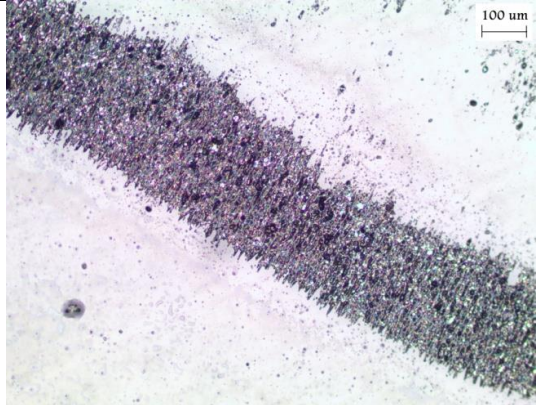
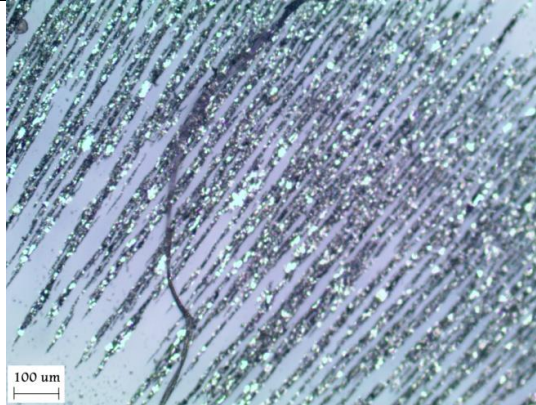
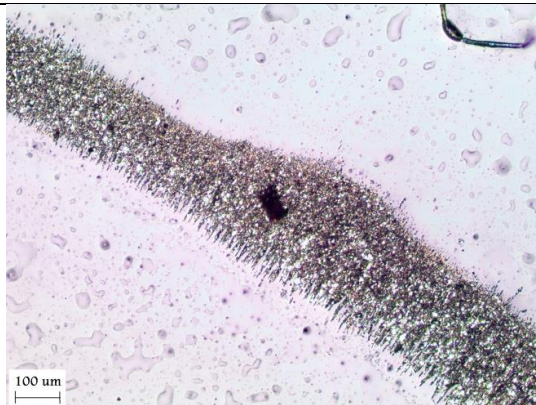
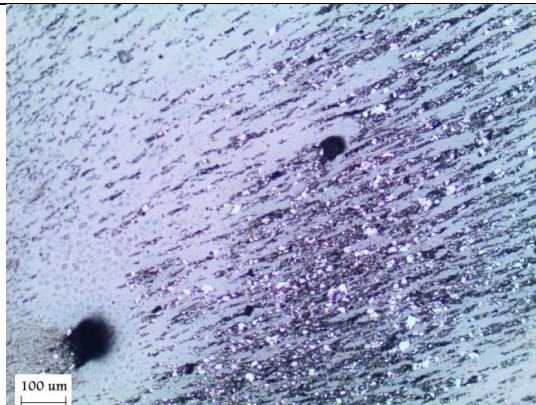
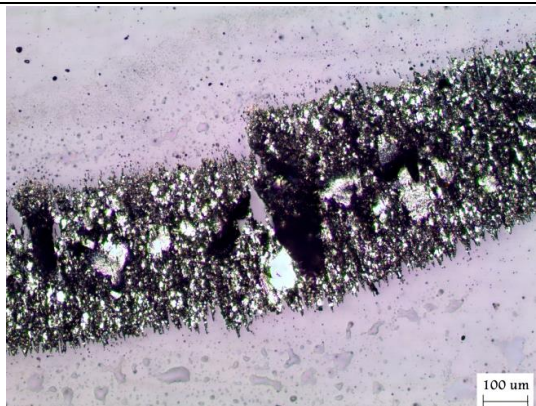
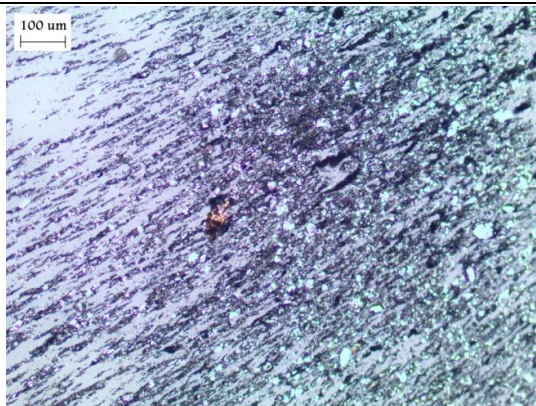
Os Quadros 2 a 4, demonstram os tamanhos das partículas encontradas nas ferrografias com o auxílio do ferrocópio, em cada uma das três amostras utilizando o separador de partículas rotativo convencional e a combinação 01.

Mostrado no Quadro 2 como esperado, houve a formação de três anéis concêntricos no dispositivo convencional. Os três anéis apresentaram poucas partículas pretas de óxidos alinhadas no campo magnético, e tem como provável causa a lubrificação insuficiente. Os três anéis também apresentaram partículas de desgaste de rolamento. No anel externo ficaram depositadas de partículas de desgaste ferrosas da ordem de 1-10 μm , enquanto o anel central teve partículas depositadas de 1-50 μm de tamanho, já no anel interno ficaram depositas as partículas da ordem de 1-10 μm . As partículas maiores ficaram depositadas onde a densidade de fluxo magnético é menor (como mostrado na Tabela 18), e as partículas de tamanho menor ficaram depositadas na região de maior densidade de fluxo magnético.

Na combinação 01 houve a formação de três anéis concêntricos, porém de qualidade inferior ao do RPD convencional. Conforme a Tabela 18, a densidade de fluxo magnético é maior no anel externo. No anel externo ficaram depositadas de partículas de desgaste ferrosas

da ordem de $1\text{-}36\ \mu\text{m}$, enquanto no anel central ficaram depositadas partículas de $1\text{-}37,5\ \mu\text{m}$ de tamanho, já no anel interno ficaram depositas as partículas da ordem de $1\text{-}46\ \mu\text{m}$.

Quadro 2 - Comparação 01

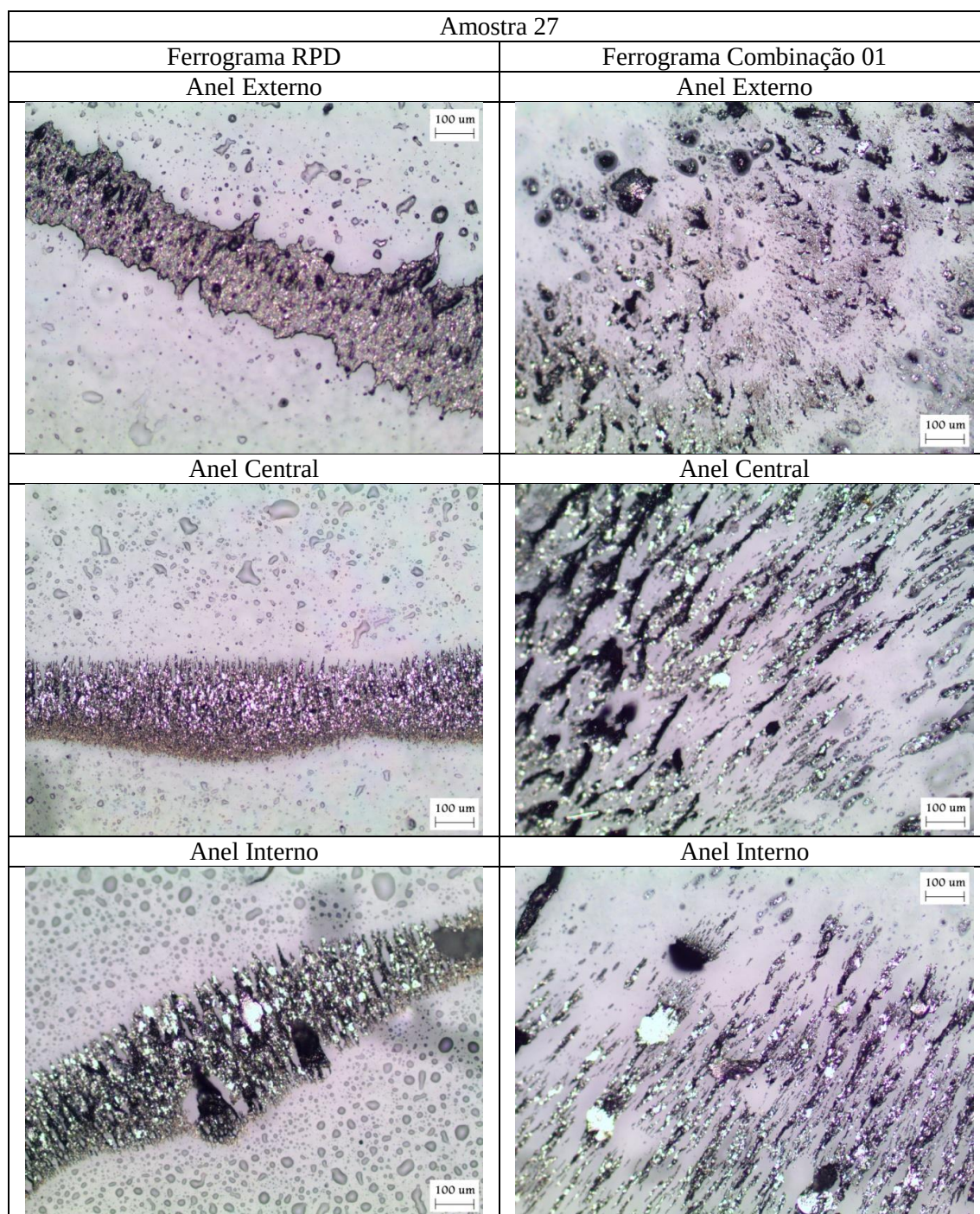
Amostra 07	
Ferrograma RPD	Ferrograma Combinação 01
Anel Externo	Anel Externo
	
Anel Central	Anel Central
	
Anel Interno	Anel Interno
	

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Conforme o Quadro 3, o RPD convencional, também na amostra 27 formou-se três anéis concêntricos. Os três anéis apresentaram quantidade maior de partículas pretas de óxidos

em relação à amostra 07. Os três anéis também apresentaram tamanho de partículas de desgaste de rolamento semelhantes à amostra 07. Nos três anéis houve uma redução na quantidade de partículas de desgaste por tamanho em relação à amostra 07.

A combinação 01 formou-se três anéis concêntricos, também de qualidade inferior ao modelo convencional. No anel externo ficaram depositadas partículas de desgaste ferrosas da ordem de 1-40 μm , enquanto o anel central teve partículas depositadas de 1-52,5 μm de tamanho, já no anel interno ficaram depositas as partículas da ordem de 1-124 μm .



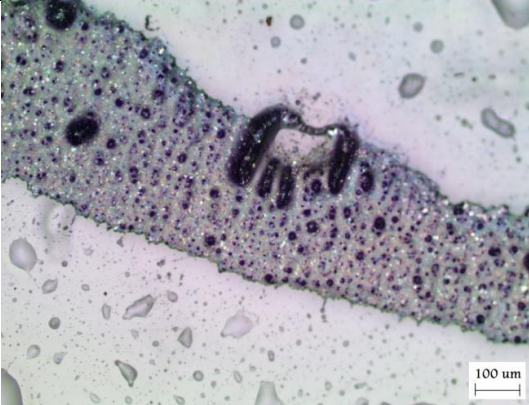
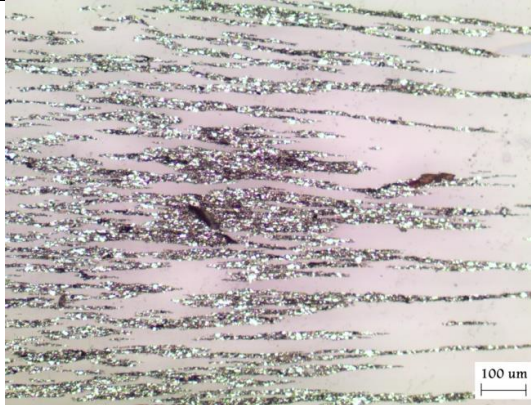
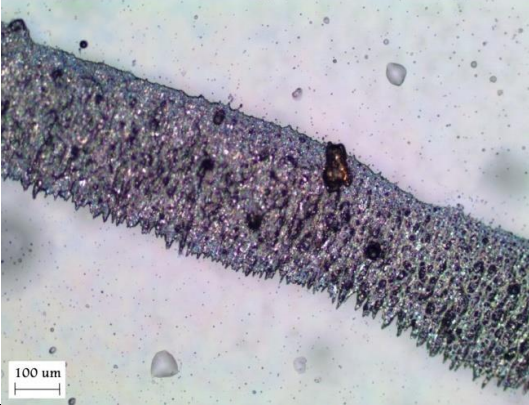
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Exposto no Quadro 4, através do separador de partículas rotativo convencional, assim como as amostras 07 e 27, à amostra 36 houve a formação de três anéis concêntricos. Os três anéis apresentaram quantidade maior de partículas pretas de óxidos em relação às amostras 07 e 27. Os três anéis também apresentaram tamanho de partículas de desgaste de rolamento, porém de tamanhos maiores em relação às amostras 07 e 27, também houve deposição

pouquíssimas partículas de desgaste de engrenagem. Nos três anéis houve uma redução na quantidade de partículas de desgaste por tamanho em relação às amostras 07 e 27.

Na combinação 01 houve a formação de três anéis concêntricos, assim como as amostras 07 e 27, à amostra 36 apresentou uma qualidade inferior de formação de anéis em relação ao modelo convencional. No anel externo ficaram depositadas partículas de desgaste ferrosas da ordem de 1-24 μm , enquanto o anel central teve partículas depositadas de 1-37,5 μm de tamanho, já no anel interno ficaram depositas as partículas da ordem de 1-60,5 μm .

Quadro 4 - Comparação 03

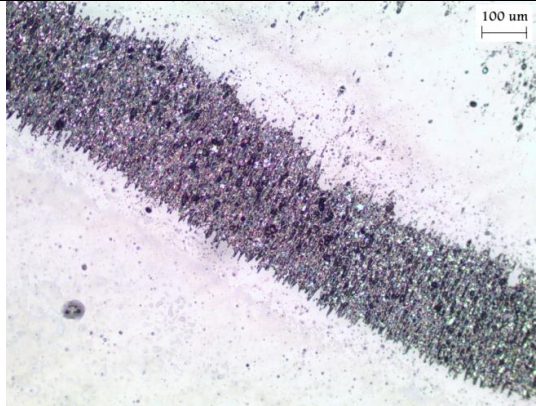
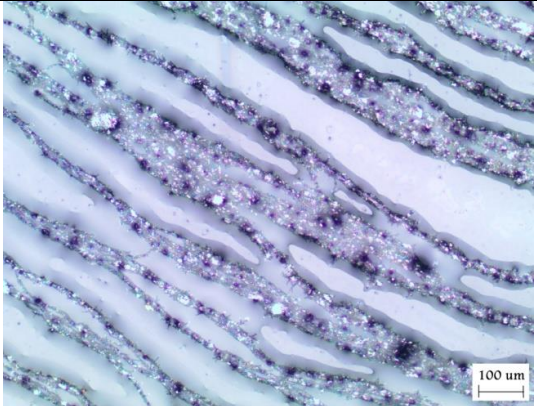
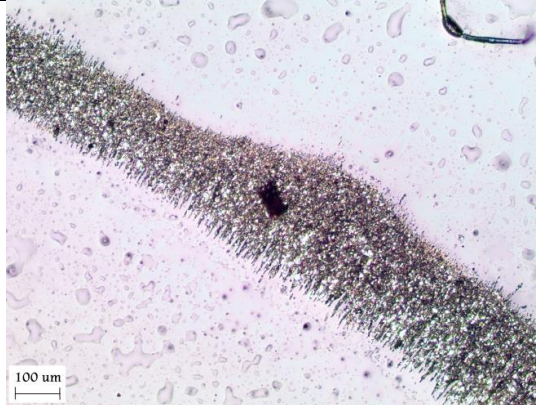
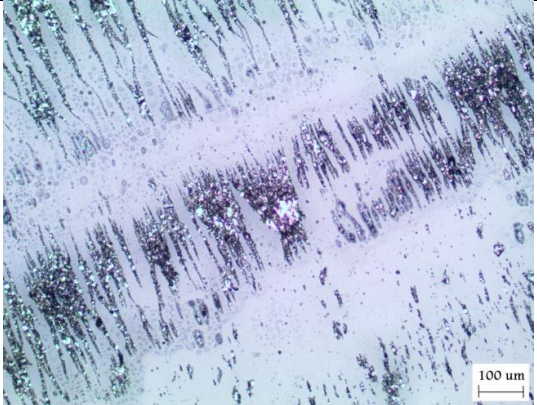
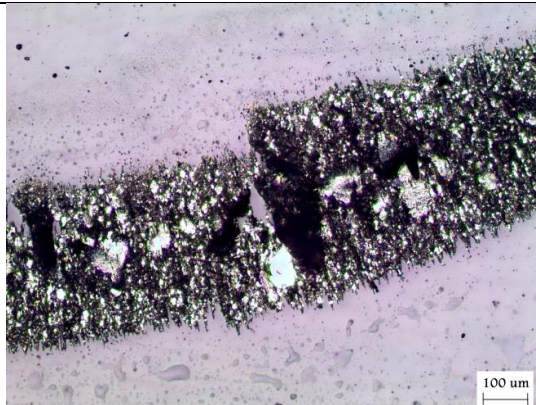
Amostra 36	
Ferrograma RPD	Ferrograma Combinação 01
Anel Externo	Anel Externo
	
Anel Central	Anel Central
	
Anel Interno	Anel Interno
	

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Os Quadros 5 a 7, demonstram os tamanhos das partículas encontradas nas ferrogafias com o auxílio do ferrocópio, em cada uma das três amostras utilizando o separador de partículas rotativo convencional e a combinação 02. De acordo com a Tabela 18, a densidade de fluxo magnético é maior no anel interno na combinação 02.

Como mostrado no Quadro 5, a combinação 02 houve a formação de dois anéis concêntricos, à amostra 07 apresentou uma qualidade de formação de anéis inferior em relação ao modelo convencional. No anel externo ficaram depositadas partículas de desgaste ferrosas da ordem de 1-66 μm , enquanto o anel interno teve partículas depositadas de 1-45 μm de tamanho.

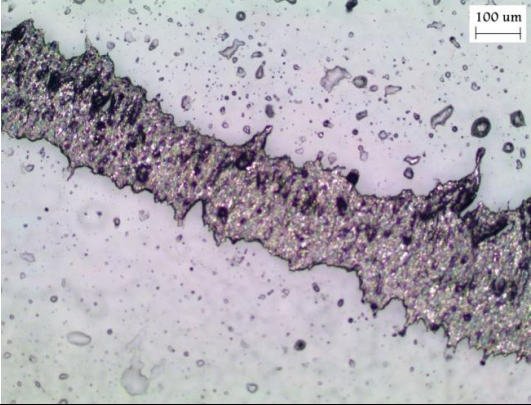
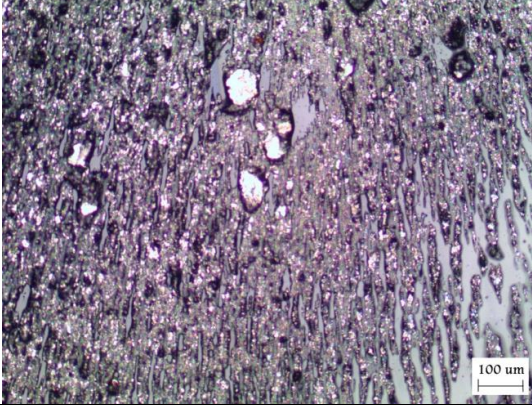
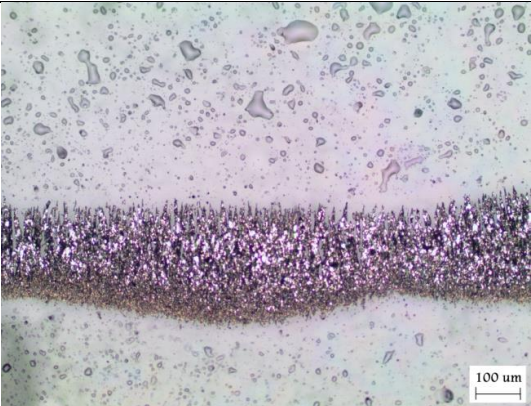
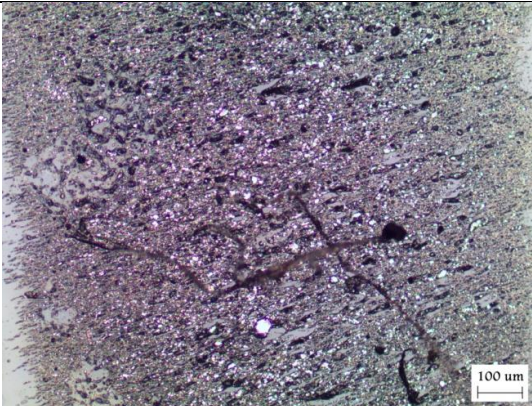
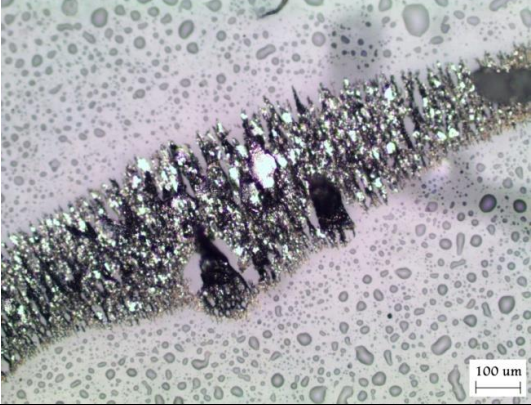
Quadro 5 - Comparação 04

Amostra 07	
Ferrograma RPD	Ferrograma Combinação 02
Anel Externo	Anel Externo
	
Anel Central	Anel Interno
	
Anel Interno	
	

Fonte: Elaboração do próprio autor.

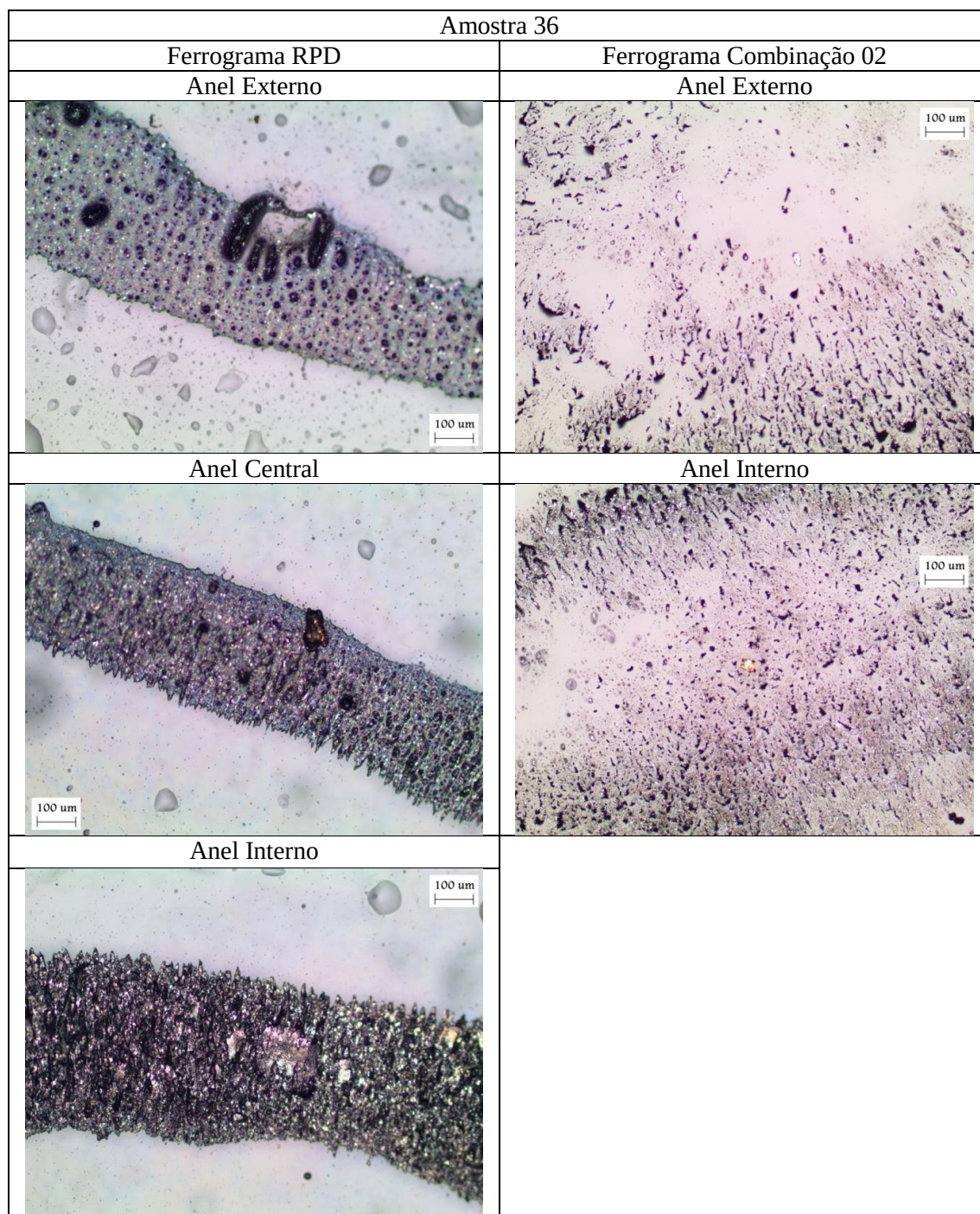
Conforme o Quadro 6, a combinação 02 houve a formação de dois anéis concêntricos, à amostra 27 apresentou uma qualidade de formação de anéis inferior em relação ao modelo convencional. No anel externo ficaram depositadas partículas de desgaste ferrosas da ordem de 1-87 μm , já no anel interno ficaram depositadas as partículas da ordem de 1-30 μm .

Quadro 6 - Comparação 05

Amostra 27	
Ferrograma RPD	Ferrograma Combinação 02
Anel Externo	Anel Externo
	
Anel Central	Anel Interno
	
Anel Interno	
	

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Exposto no Quadro 7, a combinação 02 houve a formação de dois anéis concêntricos, assim como às amostras 07 e 27, a amostra 36 apresentou uma qualidade inferior de formação de anéis em relação ao modelo convencional. No anel externo ficaram depositadas partículas de desgaste ferrosas da ordem de 1-35 μm , enquanto o anel interno teve partículas depositadas de 1-18 μm de tamanho.

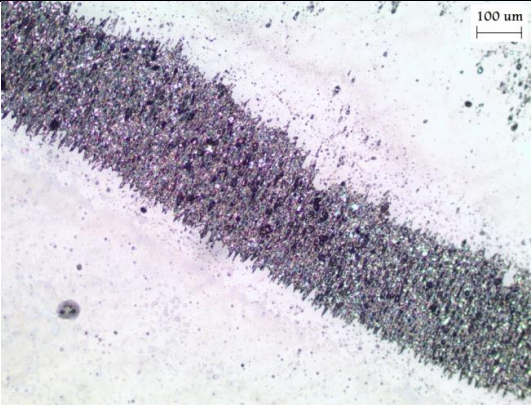
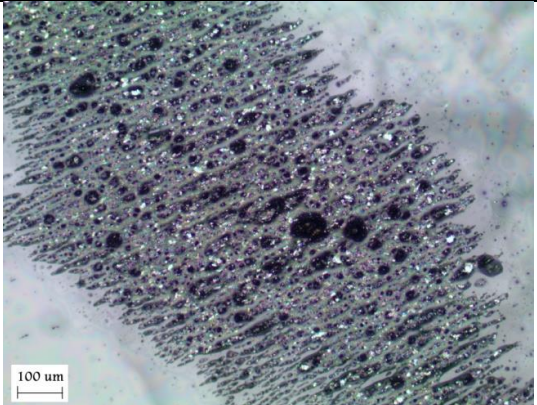
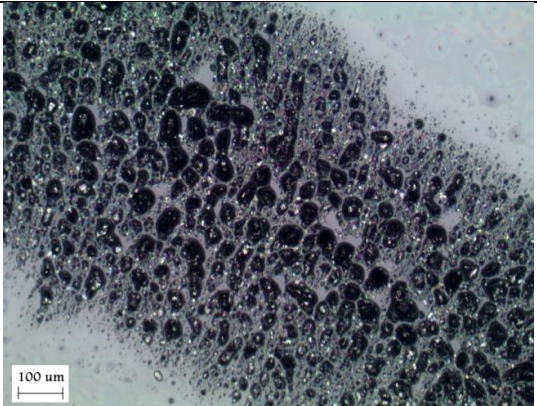
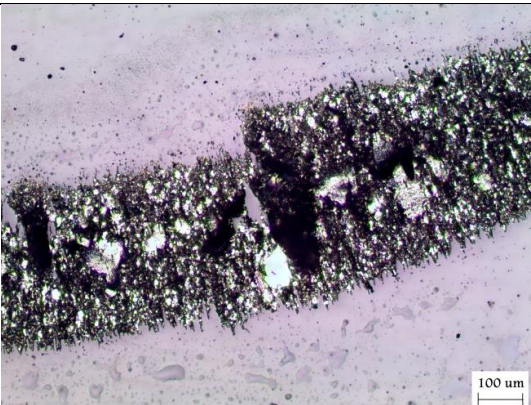
Quadro 7 - Comparação 06

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Os Quadros 8 a 10, demonstram os tamanhos das partículas encontradas nas ferrografias com o auxílio do ferrocópio, em cada uma das três amostras utilizando o separador de partículas rotativo convencional e a combinação 03. Conforme a Tabela 18, a densidade de fluxo magnético é maior no anel externo na combinação 03.

Como mostrado no Quadro 8, a combinação 03 houve a formação de dois anéis concêntricos, à amostra 07 apresentou uma boa qualidade de formação de anéis em relação ao modelo convencional. No anel externo ficaram depositadas partículas de desgaste ferrosas da ordem de 1-22 μm , enquanto o anel interno teve partículas depositadas de 1-33 μm de tamanho.

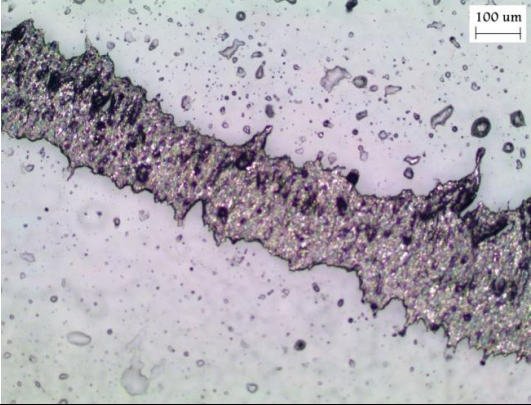
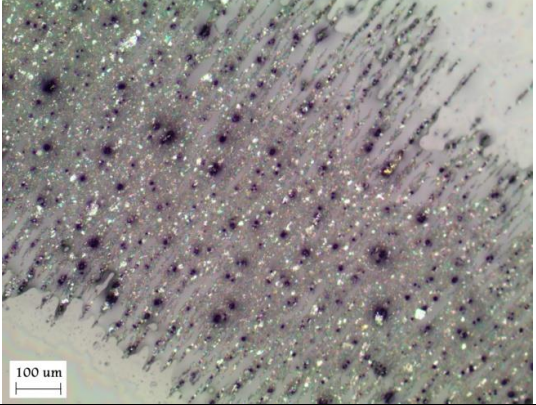
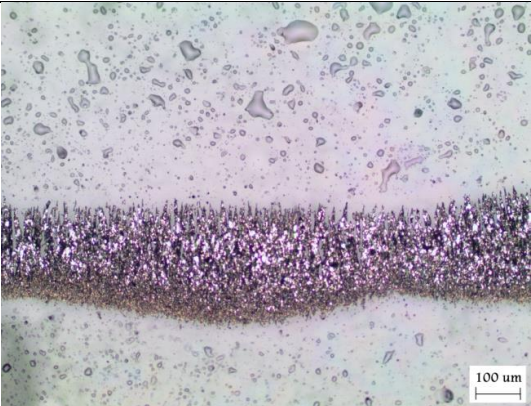
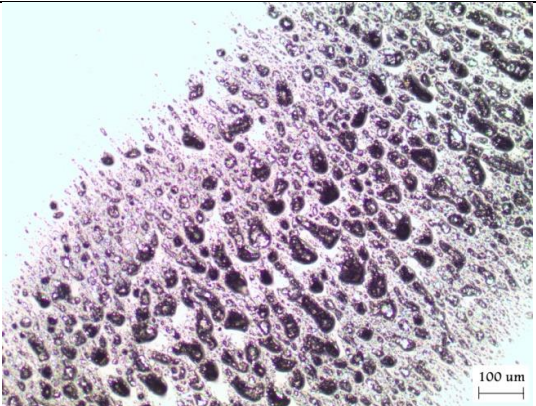
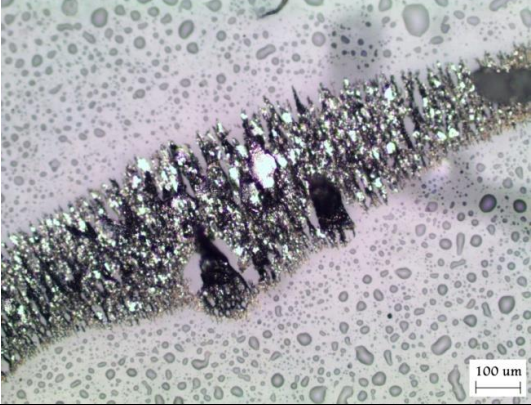
Quadro 8 - Comparação 07

Amostra 07	
Ferrograma RPD	Ferrograma Combinação 03
Anel Externo	Anel Externo
	
Anel Central	Anel Interno
	
Anel Interno	
	

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Conforme o Quadro 9, a combinação 03 houve a formação de dois anéis concêntricos, à amostra 27 apresentou uma boa qualidade de formação de anéis quando comparado ao modelo convencional. No anel externo ficaram depositadas partículas de desgaste ferrosas da ordem de 1-25 μm , já no anel interno ficaram depositadas as partículas da ordem de 1-49 μm .

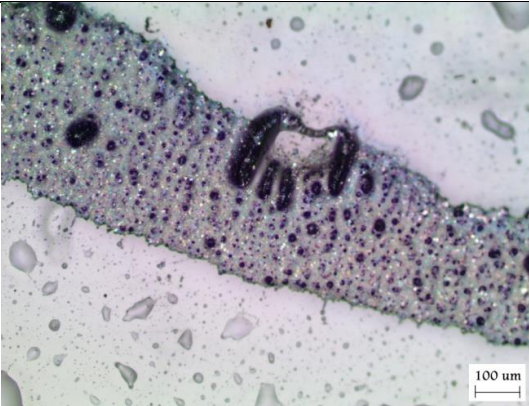
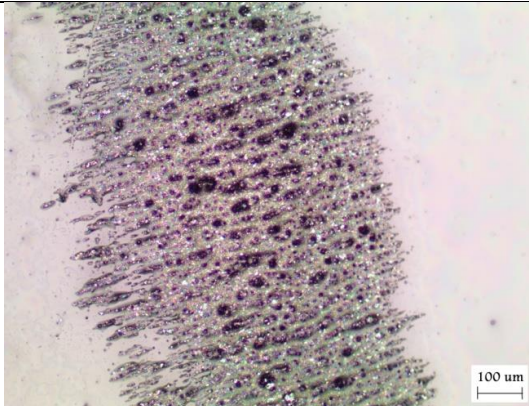
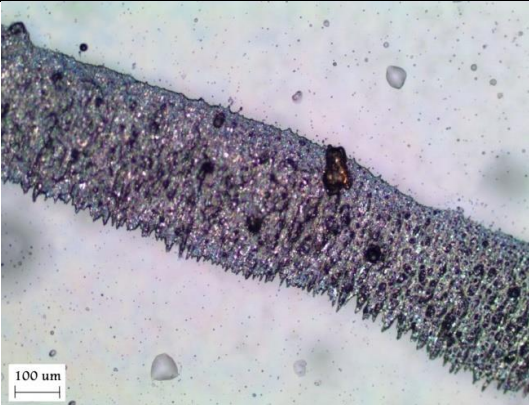
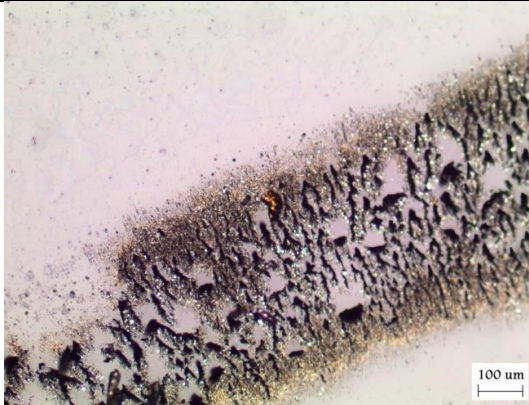
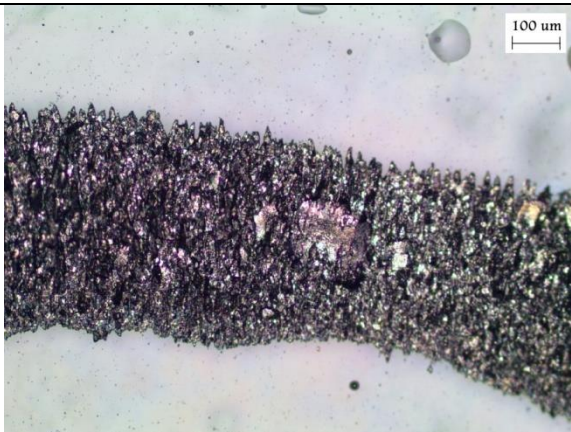
Quadro 9 - Comparação 08

Amostra 27	
Ferrograma RPD	Ferrograma Combinação 03
Anel Externo	Anel Externo
	
Anel Central	Anel Interno
	
Anel Interno	
	

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Exposto no Quadro 10, a combinação 03 houve a formação de dois anéis concêntricos, assim como às amostras 07 e 27, à amostra 36 apresentou uma boa qualidade de formação de anéis em relação ao modelo convencional. No anel externo ficaram depositadas partículas de desgaste ferrosas da ordem de 1-22 μm , enquanto o anel interno teve partículas depositadas de 1-43 μm de tamanho.

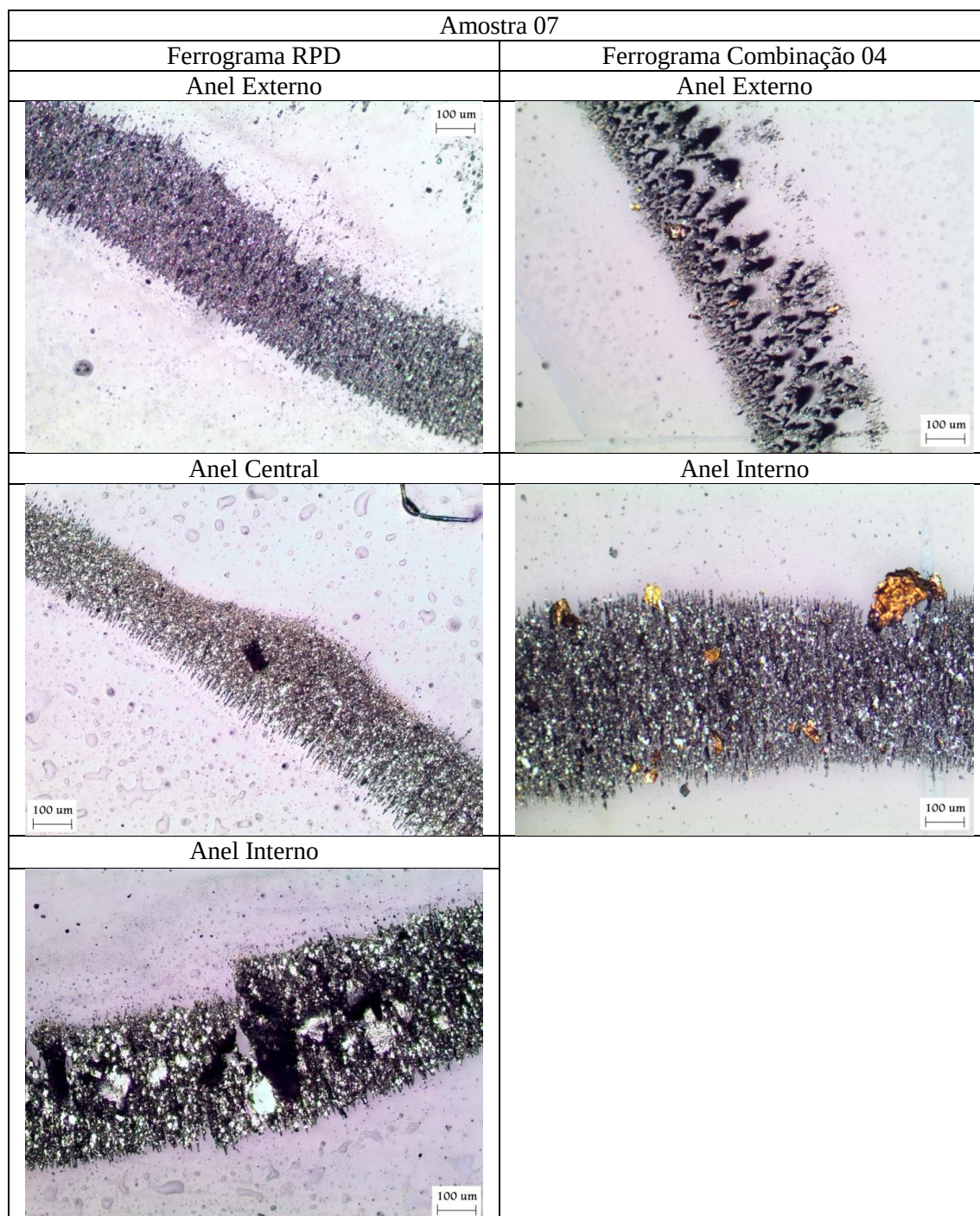
Quadro 10 - Comparação 09

Amostra 36	
Ferrograma RPD	Ferrograma Combinação 03
Anel Externo	Anel Externo
	
Anel Central	Anel Interno
	
Anel Interno	
	

Fonte: Elaboração do próprio autor.

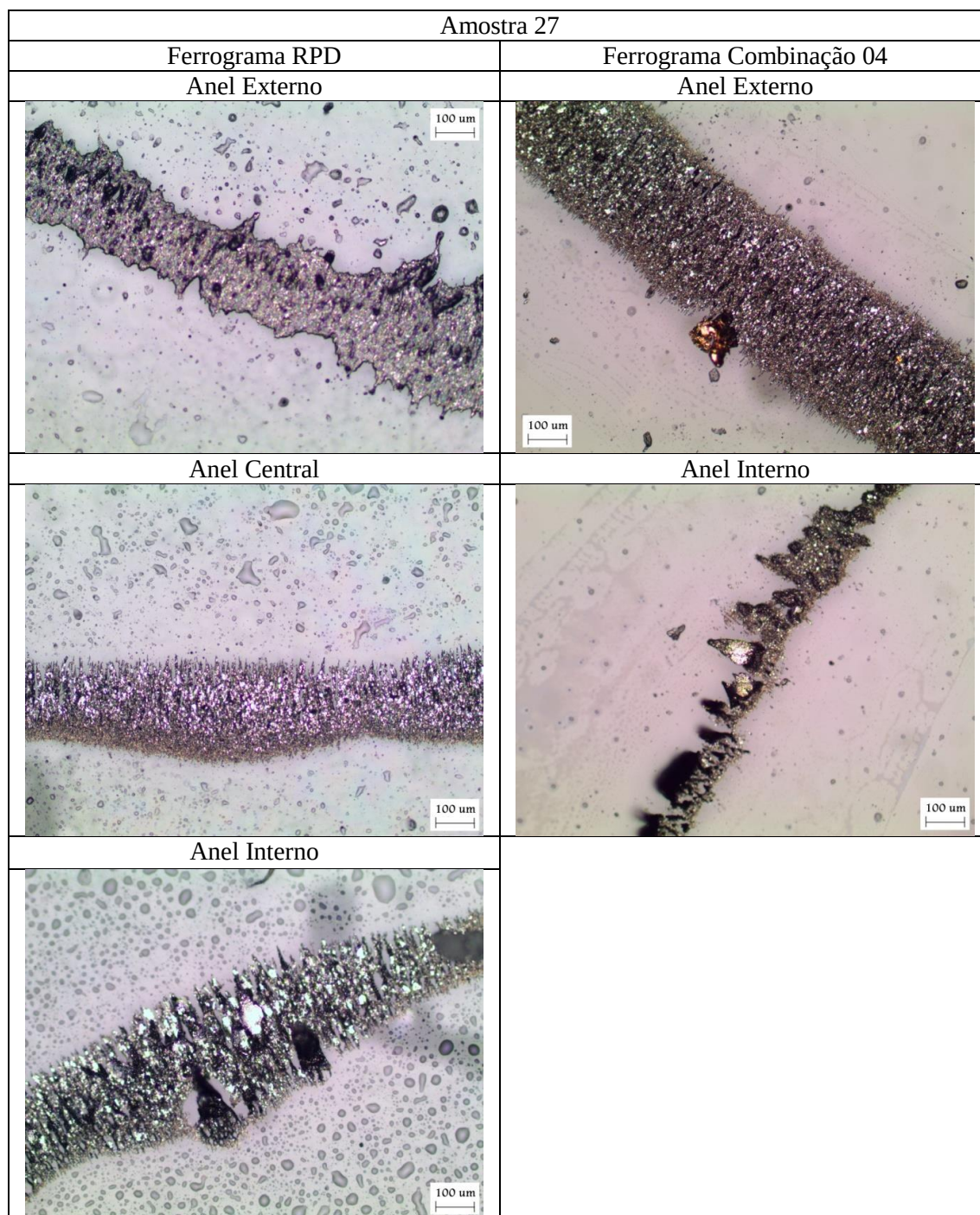
Os Quadros 11 a 13, demonstram os tamanhos das partículas encontradas nas ferrografias com o auxílio do ferrocópio, em cada uma das três amostras utilizando o separador de partículas rotativo convencional e a combinação 04. De acordo com a Tabela 18, a densidade de fluxo magnético é maior no anel externo na combinação 04.

Como mostrado no Quadro 11, a combinação 04 houve a formação de dois anéis concêntricos, o ferrograma da amostra 07 apresentou uma boa qualidade de formação de anéis em relação ao modelo convencional. No anel externo ficaram depositadas partículas de desgaste ferrosas da ordem de 1- 22 μm , enquanto o anel interno teve partículas depositadas de 1-33 μm de tamanho.

Quadro 11 - Comparação 10.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

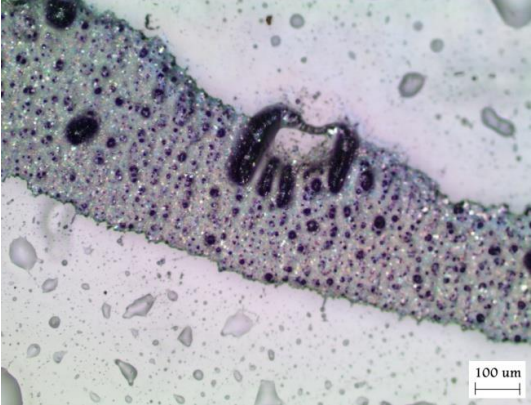
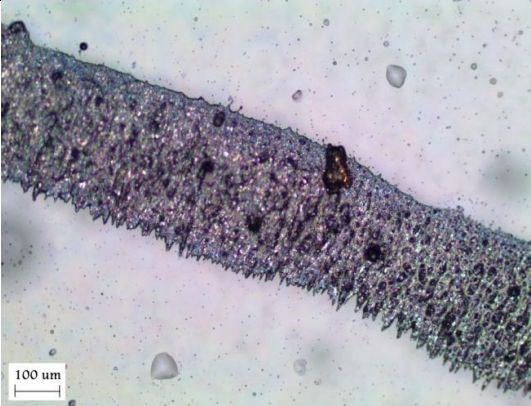
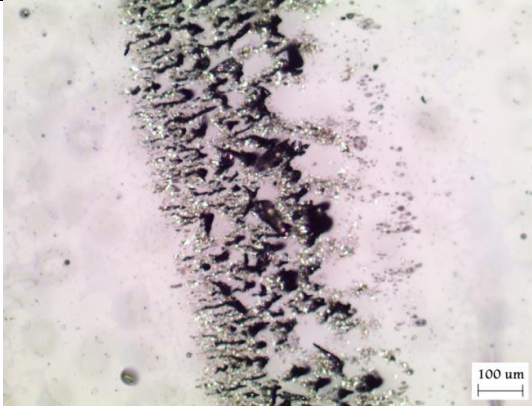
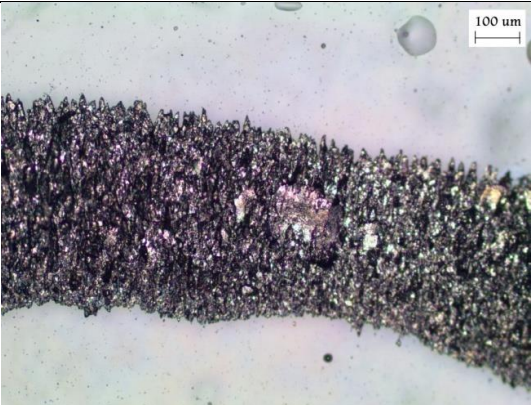
Conforme o Quadro 12, a combinação 04 houve a formação de dois anéis concêntricos, à amostra 27 apresentou uma boa qualidade de formação de anéis quando comparado ao modelo convencional. No anel externo ficaram depositadas partículas de desgaste ferrosas da ordem de 1-24 μm , já no anel interno ficaram depositadas as partículas da ordem de 1-117 μm .

Quadro 12 - Comparação 11

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Exposto no Quadro 13, a combinação 04 houve a formação de dois anéis concêntricos, assim como as amostras 07 e 27, à amostra 36 apresentou uma boa qualidade de formação de anéis em relação ao modelo convencional. No anel externo ficaram depositadas de partículas de desgaste ferrosas da ordem de 1-24 μm , enquanto o anel interno teve partículas depositadas de 1-92 μm de tamanho.

Quadro 13 - Comparação 12

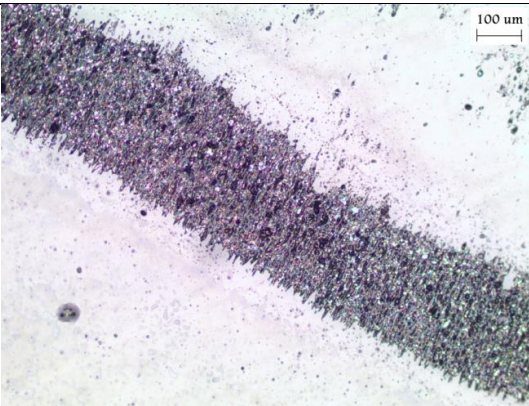
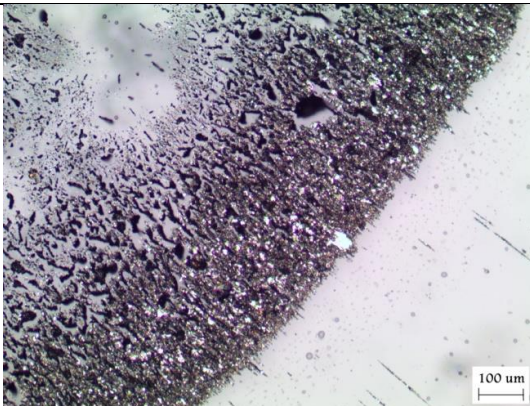
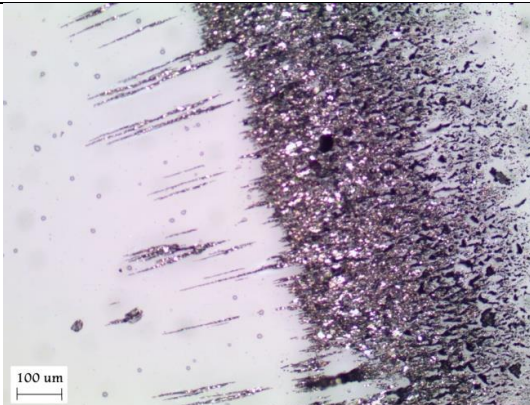
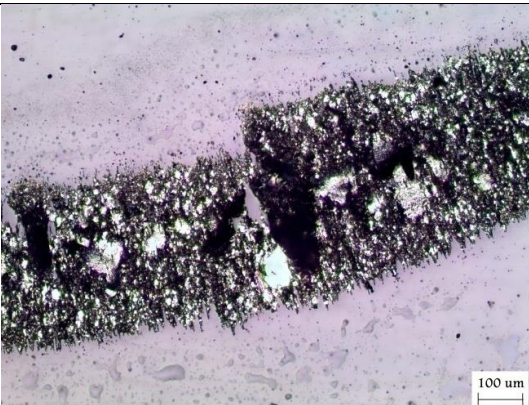
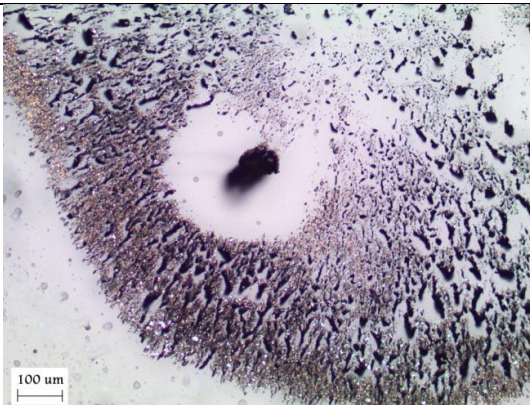
Amostra 36	
Ferrograma RPD	Ferrograma Combinação 04
Anel Externo	Anel Externo
	
Anel Central	Anel Interno
	
Anel Interno	
	

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Os Quadros 14 a 16, demonstram os tamanhos das partículas encontradas nas ferrografias com o auxílio do ferrosópio, em cada uma das três amostras utilizando o separador de partículas rotativo convencional e a combinação 05. Conforme a Tabela 18, a densidade de fluxo magnético é maior no anel externo na combinação 05.

Como mostrado no Quadro 14, a combinação 05 houve a formação de três anéis concêntricos, à amostra 07 apresentou uma boa qualidade de formação de anéis em relação ao modelo convencional, sendo que no anel externo e central são mais próximos. No anel externo ficaram depositadas partículas de desgaste ferrosas da ordem de 1-57 μm , enquanto o anel central teve partículas depositadas de 1-24 μm de tamanho, já no anel interno ficaram depositadas as partículas da ordem de 1-10 μm ,

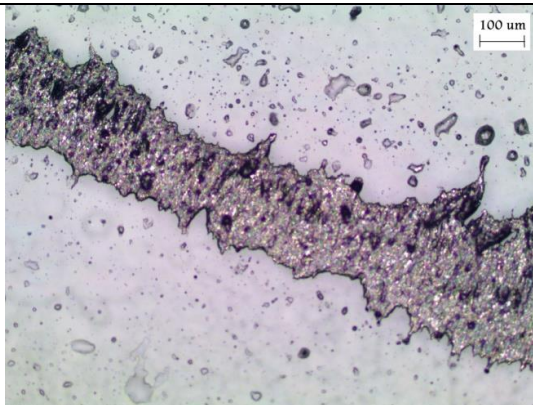
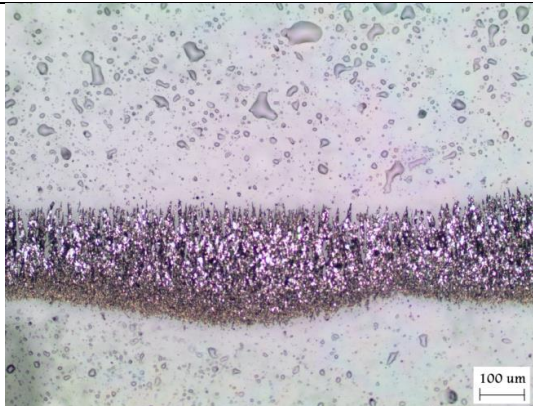
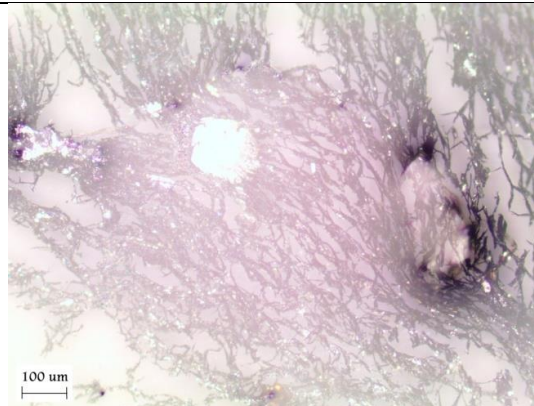
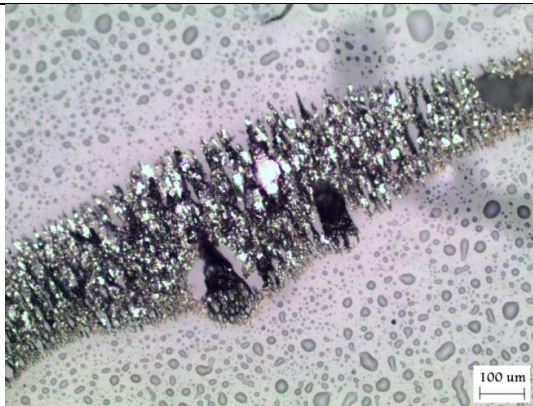
Quadro 14 - Comparação 13

Amostra 07	
Ferrograma RPD	Ferrograma Combinação 05
Anel Externo	Anel Externo
	
Anel Central	Anel Central
	
Anel Interno	Anel Interno
	

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Conforme o Quadro 15, a combinação 05 houve a formação de três anéis concêntricos, à amostra 27 apresentou uma qualidade inferior em relação ao modelo convencional. Pois em todos os anéis ficaram depositadas grandes partículas de desgaste (maiores que $170\ \mu\text{m}$).

Quadro 15 - Comparação 14

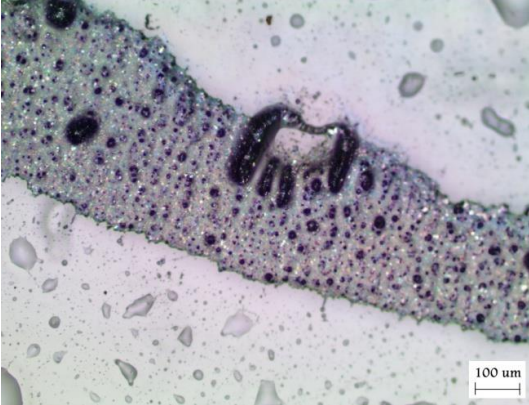
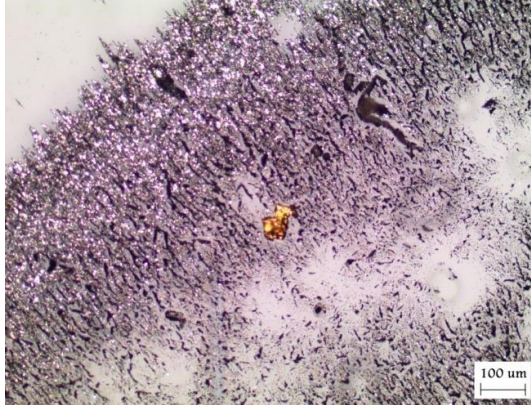
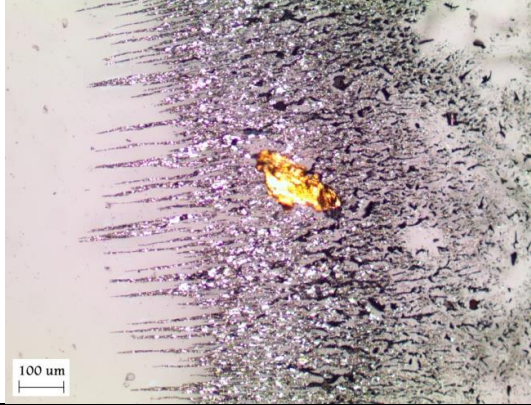
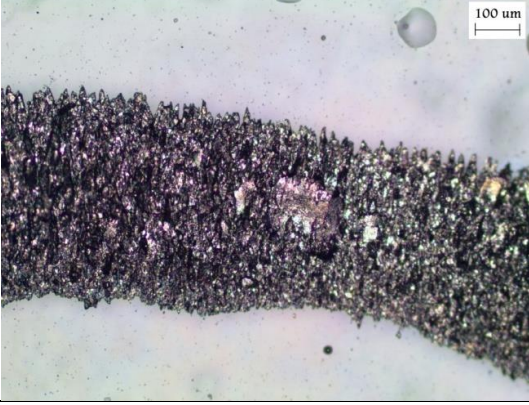
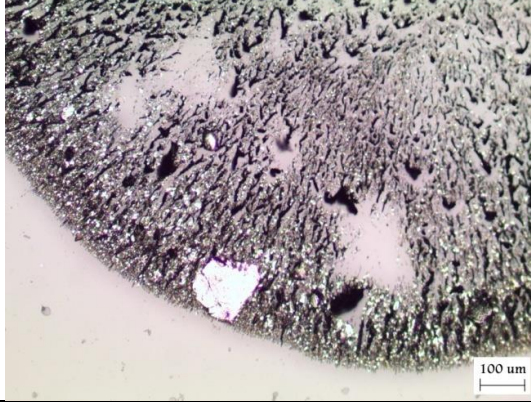
Amostra 27	
Ferrograma RPD	Ferrograma Combinação 05
Anel Externo	Anel Externo
	
Anel Central	Anel Interno
	
Anel Interno	
	

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Exposto no Quadro 16, a combinação 05 houve a formação de três anéis concêntricos, assim como à amostra 07, à amostra 36 apresentou uma boa qualidade de formação de anéis em

relação ao modelo convencional. No anel externo ficaram depositadas partículas de desgaste ferrosas da ordem de 1-59 μm , enquanto o anel central teve partículas depositadas de 1-23 μm de tamanho, já no anel interno ficaram depositas as partículas da ordem de 1-9 μm .

Quadro 16 - Comparação 15.

Amostra 36	
Ferrograma RPD	Ferrograma Combinação 05
Anel Externo	Anel Externo
	
Anel Central	Anel Central
	
Anel Interno	Anel Interno
	

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Em todos os ferrogramas obtidos utilizando a amostra 36 houve deposição de pouquíssimas partículas de desgaste de engrenagem.

Todos os ferrogramas empregando as combinações 01 a 05, assim como o RPD convencional, ocorreu a deposição de partículas pretas de óxidos alinhadas no campo magnético, sendo que a amostra 36 apresentou quantidade maior dessas partículas de óxidos em relação as amostras 07 e 27.

Também os ferrogramas utilizou as combinações 01 a 05, bem como o separador de partículas convencional, apresentaram a ocorrência de partículas de desgaste de rolamento, porém tamanhos maiores são encontrados nas amostras 07 e 27.

5 CONCLUSÕES

Todos os tipos de partículas encontradas no aparelho convencional estão presentes no aparelho projetado e construído, independentemente da combinação utilizada.

As partículas de tamanho maior ficam depositadas onde a densidade de fluxo magnético é menor, e as partículas de tamanho menor ficam depositadas na região de maior densidade de fluxo magnético, portanto, a densidade de fluxo magnético é inversamente proporcional ao tamanho da partícula.

Partículas pretas de óxidos das amostras são ferromagnéticos ou ferrimagnéticos, pois se mostraram alinhados ao campo magnético dos ferrogramas.

As combinações 01 e 02 não apresentaram boa formação de anéis concêntricos. A combinação 05 apresentou boa formação de três anéis. Em comparação entre as combinações 01, 02 e 05, a combinação 05 apresentou a melhor separação de partículas de desgaste por tamanho. Porém a melhor combinação que proporcionou a formação mais perfeita dos anéis foi a combinação 04. Embora essa combinação apresente apenas dois anéis, estes são mais fidedignos em relação aos anéis do aparelho convencional.

A reprodução do trabalho de Chiou (1991), apresenta um custo elevado devido à aquisição da matéria-prima necessária (samário e cobalto), justificado através do estudo de Rocio et. al. (2012). Além das dificuldades de sinterização de peças de pequenas dimensões e pequenas quantidades. Também é necessário a realização de estudos para encontrar a remanência e a densidade de fluxo magnético do campo magnético essencial a ser aplicado durante a compactação (tópico 2.7.3).

O separador de partículas convencional tem um custo estimado em R\$ 180.000,00, enquanto o custo total entre aquisição de equipamentos necessários até a confecção do protótipo foi de R\$ 4727,35 (sem levar em consideração os custos de desenvolvimento do projeto e de análise), como apresentado no Apêndice D.

Os objetivos gerais e específicos do presente trabalho foram alcançados.

5.1 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Ao longo do presente trabalho surgiram sugestões para melhorias do presente trabalho, e indagações para a realização de estudos futuros, são eles:

- Projetar um sistema automático para fixação da lamínula, utilizando motores elétricos do tipo passo;

- Projetar um sistema automático de aquecimento do óleo lubrificante, e deposição do mesmo sobre a lamínula;
- Confeccionar uma ventosa que adere às lamínulas comerciais de 25x25 *mm*.
- Para a confecção de novo protótipo, realizar estudos de materiais e verificar a viabilidade econômica para utilização de técnicas de impressão em terceira dimensão para confecção de peças, visto que o protótipo confeccionado teve um custo elevado em relação as técnicas de usinagem convencional;
- Realizar estudos sobre o equilíbrio entre densidade de fluxo magnético, força centrífuga e força gravitacional, em relação à distribuição das partículas de desgaste sobre a amostra;
- Após a realização de estudos sobre o equilíbrio entre densidade de fluxo magnético, força centrífuga e força gravitacional, projetar e confeccionar um protótipo que simule diversas amplitudes de densidade de fluxo magnético e de forças centrífugas.

REFERÊNCIAS

- ABRADEE. **Níveis de tensão**. Brasília: Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica, 2016. Disponível em: <<http://www.abradee.com.br/setor-de-distribuicao/niveis-de-tensao>>. Acesso: 4 de mar 2016.
- ABRAMAN, A. **Situação da manutenção no Brasil**. Rio de Janeiro: ABRAMAN, 2007. 31 p.
- ABRAMAN, A. **Situação da manutenção no Brasil**. Rio de Janeiro: ABRAMAN, 2015. 23 p.
- AÇOS VIC. **Propriedades do aço SAE 1020**. São Paulo: Aços Vic, 2016. Disponível em: <http://acosvic.com.br/produtos_br.php>. Acesso em: 22 fev 2016.
- ALVARENGA, B.; MÁXIMO, A. **Curso de física**. São Paulo: Scipione, 1997. v. 5, 672 p.
- ANOCIBAR, H. R. **Alternativa para caracterização de ímãs permanentes com destacada anisotropia magneto cristalina sem desmagnetização irreversível**. 2011. 236 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica)- Escola de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre 2011.
- API. **Motor oil guide**. Washington: American Petroleum Institute, 2010 Disponível em: <<http://www.api.org/certification-programs/engine-oil-diesel-exhaust-fluid/~media/Files/Certification/Engine-Oil-Diesel/Publications/Engine-Oil-Guide-2010-120210.ashx>>. Acesso em: 16 mar 2016.
- ARANHA NETO, E. A. C. **Solda estanho: chumbo–aplicações na eletrônica**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2006. Disponível em: <www.eletrica.ufpr.br/piazza/materiais/EdisonNeto.pdf>. Acesso em: 18 mar 2016.
- ARATO JUNIOR, A. **Manutenção preditiva usando análise de vibrações**. Barueri: Manole, 2004. 190 p.
- ARDUINO. **Memory**. Ivrea: Arduino, 2016. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/Tutorial/Memory>>. Acesso: 4 mar 2016^a.
- ARDUINO. **Shields**. Ivrea: Arduino, 2016. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoShields>>. Acesso: 2 mar 2016^b.
- ARDUINO. **Software**. Ivrea: Arduino, 2016. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/Main/Software>>. Acesso: 4 mar 2016^c.
- ASHBY, M. **Seleção de materiais no projeto mecânico**. Rio de Janeiro: Elsevier Brasil, 2012. 696 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 5462-TB116: confiabilidade e manutenibilidade**. Rio de Janeiro, 1994.
- BEER, F. P.; JOHNSTON, E. R. **Resistência dos materiais**. 3.ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1995. 1255 p.

- BLOCH, H. P. **Practical lubrication for industrial facilities**. Lilburn: The Fairmont Press, 2009. 465 p.
- BRAGA, H. A. C.; BARBI, I. Conversores estáticos multiníveis: uma revisão. **SBA Controle & Automação**, Campinas, v. 11, n. 1, p. 20-28, 2000.
- BRANCO FILHO, G. **A Organização, o planejamento e o controle da manutenção**. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2008. 280 p.
- BUDYNAS, R. G.; NISBETT, J. K. **Elementos de máquinas de Shigley**. Porto Alegre: AMGH, 2009. 1073 p.
- CALLISTER, W. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. São Paulo: Grupo Gen-LTC, 2000. 844 p.
- CARRETEIRO, R. P.; BELMIRO, P. N. A. **Lubrificantes e lubrificação industrial**, Rio de Janeiro: Interciência, 2006. 504 p.
- CAVALCANTE, I. E. M. **Estudo cinético e reológico de graxas lubrificantes submetidas à degradação térmica oxidativa**. 2012. 100 f. Dissertação (Mestrado)– Faculdade de Química, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2012.
- CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de máquinas elétricas**. Porto Alegre: AMGH, 2013. 700 p.
- CHIAVERINI, V. **Tecnologia mecânica-materiais de construção mecânica**. 2.ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986. v. 3, 315 p.
- CHIOU, Yuang-Cherng. Study of wear particle deposition by an improved rotary ferrographic analyzer. **Wear**, Lausanne, v. 146, n. 1, p. 137-147, 1991.
- CRAWFORD, Roy J. **Plastics engineering**. Belfast: Butterworth-Heinemann, 1998. 354 p.
- DHILLON, B. S. **Engineering maintenance: a modern approach**. Boca Raton: CRC, 2002. 224 p.
- DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 8. ed. São Paulo: MM Editora, 2013. 269 p.
- EMBARCADOS. **Arduino mega 2560**. São Paulo: Embarcados, 2016. Disponível em: <<http://www.embarcados.com.br/arduino-mega-2560/>>. Acesso: 5 mar 2016.
- ESQUEMAS ELETRÔNICOS. **Campo magnético em torno de um condutor**. São Paulo: Esquemas Eletrônicos, 2016. Disponível em: <<http://eletronicos.etc.br/campo-magnetico-em-torno-de-um-condutor/>>. Acesso: 18 fev 2016.
- FALCONE, A. G. **Eletromecânica**. São Paulo: Edgard Blücher, 2011. v. 2, 308 p.
- FARIA, R. N.; LIMA, L. F. C. P. **Introdução ao magnetismo dos materiais**. São Paulo: Livraria da Física, 2005. 198 p.
- FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. São Carlos: EDGARD BLÜCHER, 1969.

FLEMING, P. V.; FRANÇA, S. R. R. O. Considerações sobre a implementação conjunta de MCC e TPM na indústria de processos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MANUTENÇÃO, 12., 1997, São Paulo. **Anais...** Rio de Janeiro: ABRAMAN, 1997. 53 p.

FRANCISCO, A. **Motores elétricos**. 5. ed. São Paulo: Lidel - Zamboni, 2013. 169 p.

GROOVER, M. P. **Introdução aos processos de fabricação**. São Paulo: LTC, 2014. 700 p.

GRUPO SUPER ÍMÃS. **Ímãs**. São Paulo: Grupo Super Ímãs, 2014. Disponível em: <<http://www.superimas.com.br/>>. Acesso em: 5 jan 2016.

GUTIÉRREZ, J. C. H. et al. Usinabilidade de materiais compósitos poliméricos para aplicações automotivas. **Polímeros**, São Carlos, v. 24, n. 6, p. 711-719, 2014.

HIRAKAWA, A. R.; CUGNASCA, C. E. **Experiência 4: interface com teclado e display**. São Paulo: Escola Politécnica da USP - Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais, 2007.

JOST, H. P. Tribology - origin and future. **Wear**, Lausanne, v. 136, n. 1, p. 1-17, 1990.

KARDEC, A.; NASCIF, J. **Manutenção: função estratégica**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2001. 440 p.

KATO K.; ADACHI K. Wear mechanisms. In: BHUSHAN, B. (Ed.). **Modern tribology handbook: principles of tribology**. Boca Raton: CRC, 2001. p. 273-300.

KIMURA, R. K. **Uso da técnica de análise de óleo lubrificante em motores diesel estacionários, utilizando-se misturas de biodiesel e diferentes níveis de contaminação do lubrificante**. 2010. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)- Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – Unesp, Ilha Solteira 2010.

KITTIWAKE - Kittiwake Developments Limited. **Rotary ferrograph**. Littlehampton: Kittiwake, 2004. (User Manual MA-K14755-KW).

LAGO, D. F. **Manutenção de redutores de velocidade pela integração das técnicas preditivas de análise de vibrações e análise de óleo lubrificante**. 2007. 151 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)- Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – Unesp, Ilha Solteira, 2007.

LEARNING ENGINEERING. **Direct current motor**. Hadapsar: Learning Engineering, 2016. Disponível em: <<http://www.learnengineering.org/2014/09/DC-motor-Working.html>>. Acesso: 13 mar 2016.

LIQUI MOLY. **Viscosidade**. Jerg-Wieland: Lubrificantes e Aditivos Alemães, 2014. Disponível em: <http://www.liqui-moly.de/liquimoly/web_pt.nsf/id/pa_kopie_es_domb8bakrw.html>. Acesso: 25 fev 2015.

MAGNAWORKS. **Magnet types**. Bohemia: Magnaworks Technology, 2014. Disponível em: <<http://www.magnaworkstechnology.com/magnets.html>>. Acesso em: 15 mar 2016.

MANG, T; DRESEL, W. (Ed.). **Lubricants and lubrication**. New York: John Wiley & Sons, 2007. 890 p.

MARGOLIS, M. **Arduino cookbook**. Sebastopol: O'Reilly, 2011. 631 p.

MARTÍN-ALFONSO, J. E. et al. Evaluation of different polyolefins as rheology modifier additives in lubricating grease formulations. **Materials Chemistry and Physics**, Valencia, v. 128, n. 3, p. 530-538, 2011.

MELCONIAN, S. **Elementos de máquinas**. São Paulo: Érica, 2000. 376 p.

MIRSHAWKA, V.; OLMEDO, N. L. **Manutenção: combate aos custos da não-eficácia- a vez do Brasil**. São Paulo Makron Books, 1993. 373 p.

MONCHY, F. **A função manutenção-formação para a gerência da manutenção industrial**. São Paulo: Durban, 1989. p. 3.

MOUBRAY, J. **Reliability centered maintenance**. New York: Industrial, 1997. 426 p.

MUNSON, B. R.; YOUNG, D. F.; OKIISHI, T. H. **Fundamentos da mecânica dos fluidos**. 4. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2004. v. 1. 584 p.

MURTY, A. S. R.; NAIKAN, V. N. A. Availability and maintenance cost optimization of a production plant. **International Journal of Quality & Reliability Management**, Cambridge, v. 12, n. 2, p. 28-35, 1995.

NEOYAMA. **Micromotores DC**. Joinville: Neoyama, 2016. Disponível em: <<http://www.neoyama.com.br/produtos/micromotores/>>. Acesso: 9 jul 2016.

PETRUZELLA, F. **Motores elétricos e acionamentos**. Porto Alegre: Bookman, 2013. 366 p. (Série Tekne).

ROCIO, M. A. R. et al. **Terras-raras: situação atual e perspectivas**. Rio de Janeiro: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2012. p. 369-420. (BNDES Setorial, 35).

SAE. **Composição de materiais**. Warrendale: Society of Automotive Engineers, 2016. Disponível em: <<http://topics.sae.org/composite-materials/automotive/>>. Acesso em: 29 fev 2016.

SÁNCHEZ, M. C. et al. Atomic force microscopy and thermo-rheological characterisation of lubricating greases. **Tribology letters**, Gewerbestrasse, v. 41, n. 2, p. 463-470, 2011.

SHACKELFORD J. F. **Ciência dos materiais**. 6. ed. São Paulo: Pearson, 2013. 576 p.

SHIGLEY, J. E. **Elementos de máquinas 2**. São Paulo: Livros Técnicos e Científicos, 1984. 699 p.

SILVA, E. F. M. S. **Investigação de técnicas para o acompanhamento do desgaste de um par engrenado utilizando tribologia e análise da resposta dinâmica processada via função densidade probabilidade Beta**. 2015. 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)-Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – Unesp, Ilha Solteira, 2015.

SINATORA, A. **Tribologia**: um resgate histórico e o estado-da-arte. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2005. 33 p.

SUGANUMA, K. Advances in lead-free electronics soldering. **Current Opinion in Solid State and Materials Science**, Oxford, v. 5, n. 1, p. 55-64, 2001.

TAKAHASHI, Y. **TPM/MPT**: manutenção produtiva total. São Paulo: IMAM, 1993. 332 p.

TERMOMECAÂNICA. **Bronze TM23**. São Paulo: Termodinâmica, 2016. Disponível em: <<http://www.termomecanica.com.br/default.asp?p=bronze>>. Acesso em: 22 de fev 2016.

TEXACO. **Fundamentos de lubrificação**. Rio de Janeiro: Chevron do Brasil, 2005. 73 p.

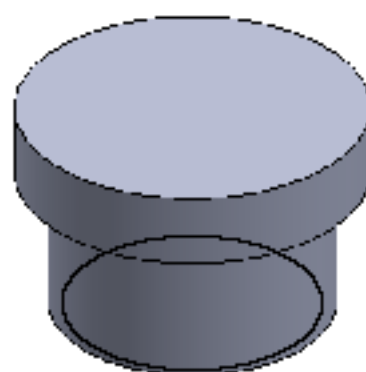
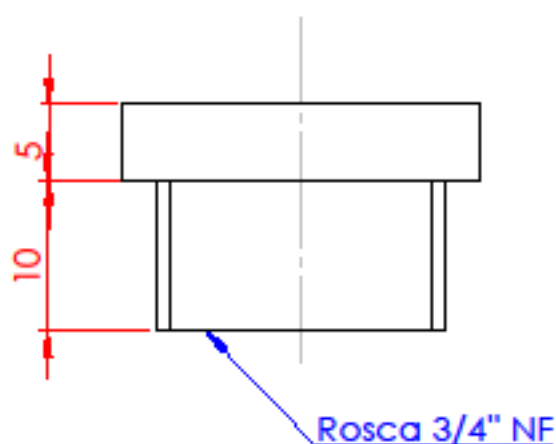
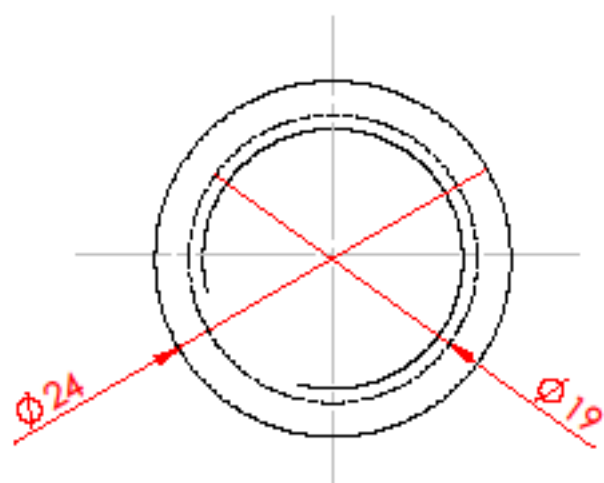
TROYER, D.; FITCH, J. C. **Oil analysis basics**. Tulsa: Noria corporation, 2001. 184 p.

VANAT, K. J.; BRAGHINI JUNIOR, A. O uso de ferramentas de metal duro no torneamento do nylon. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, São Paulo, v. 11, n. 1, p. 50-57, 2014.

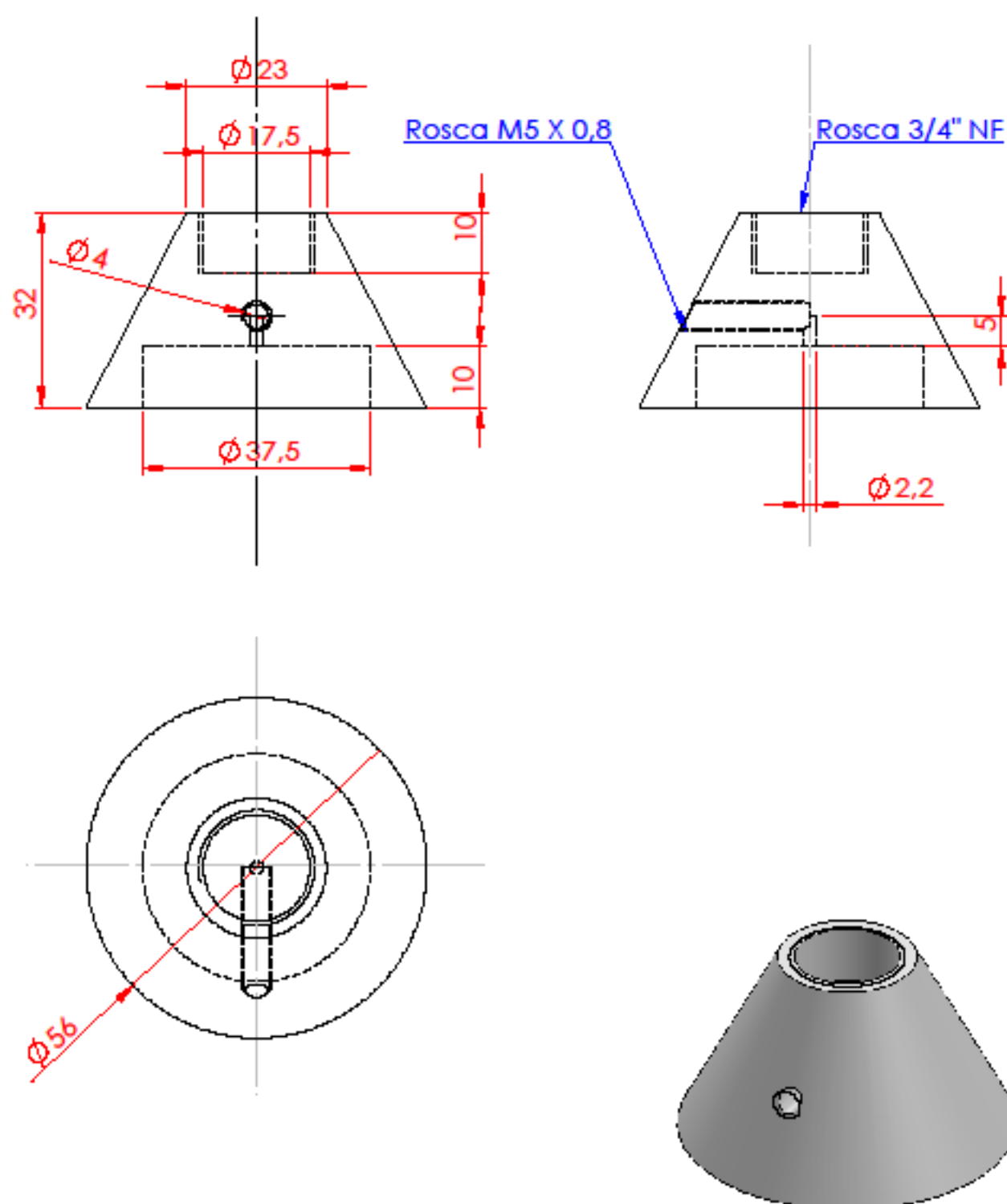
VIANA, H. R. G. **Planejamento e Controle da Manutenção - PCM**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2002. 196 p.

APÊNDICE A - PROJETO

Este apêndice demonstra os detalhes do projeto dos componentes do protótipo. O projeto do protótipo foi realizado utilizando *software* CAD (SolidWorks).



SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS ACABAM. SUPERFÍCIE: TOLERÂNCIAS: LINEAR: ANGULAR:		ACABAMENTO:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		NÃO MUDAR A ESCALA DO DESENHO		REVISÃO	
NOME		ASSINATURA		DATA		TÍTULO:			
DES. Murilo Cirilo						Base de teste			
VERIF.									
APROV.									
MANUF.									
QUANT. 1 peça				MATERIAL:		DES. Nº		A4	
				Poliamida 6		001			
				PESO:		ESCALA 2:1		FOLHA 1 DE 1	



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

ACABAMENTO:

DEBUR AND
BREAK SHARP
EDGES

NÃO MUDAR A ESCALA DO DESENHO

REVISÃO

DES. Murilo Cirilo

ASSINATURA

DATA

VERIF.

APROV.

MANUF.

QUANT. 1 peça

MATERIAL:

Poliamida 6

PESO:

TÍTULO:

Cúpula cônica

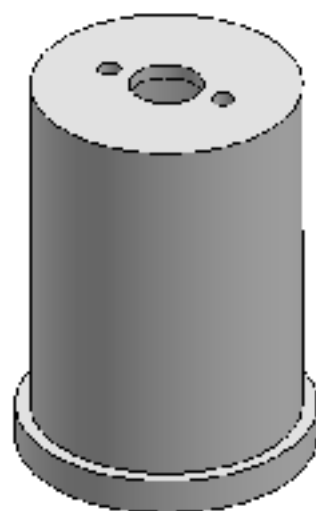
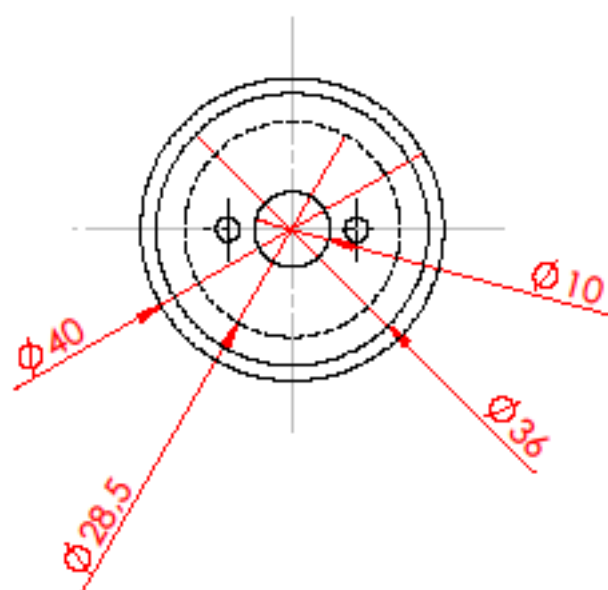
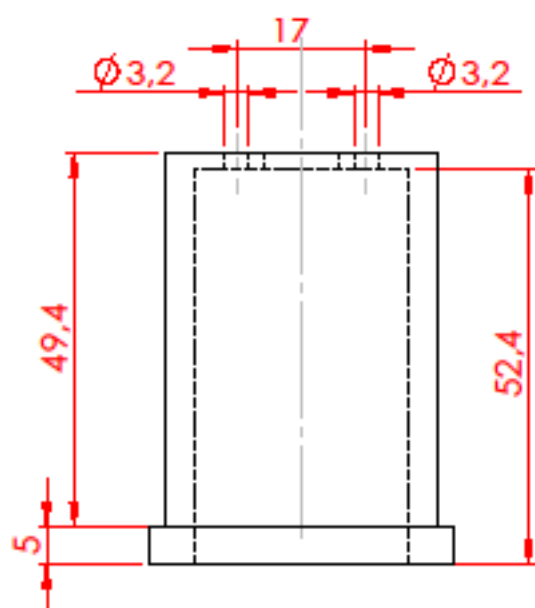
DES. Nº

002

A4

ESCALA 2:1

FOLHA 1 DE 1



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

ACABAMENTO:

DEBUR AND
BREAK SHARP
EDGES

NÃO MUDAR A ESCALA DO DESENHO

REVISÃO

	NOME	ASSINATURA	DATA		
DES.	Murilo Cirilo				
VERIF.					
APROV.					
MANUF.					
QUANT.	1 peça				

MATERIAL:

Poliamida 6

PESO:

título:

Suporte motor elétrico

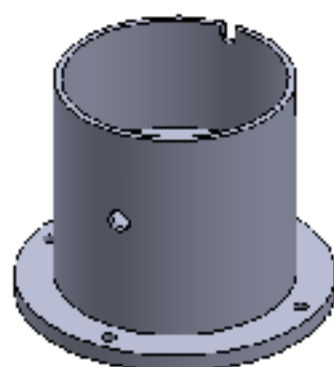
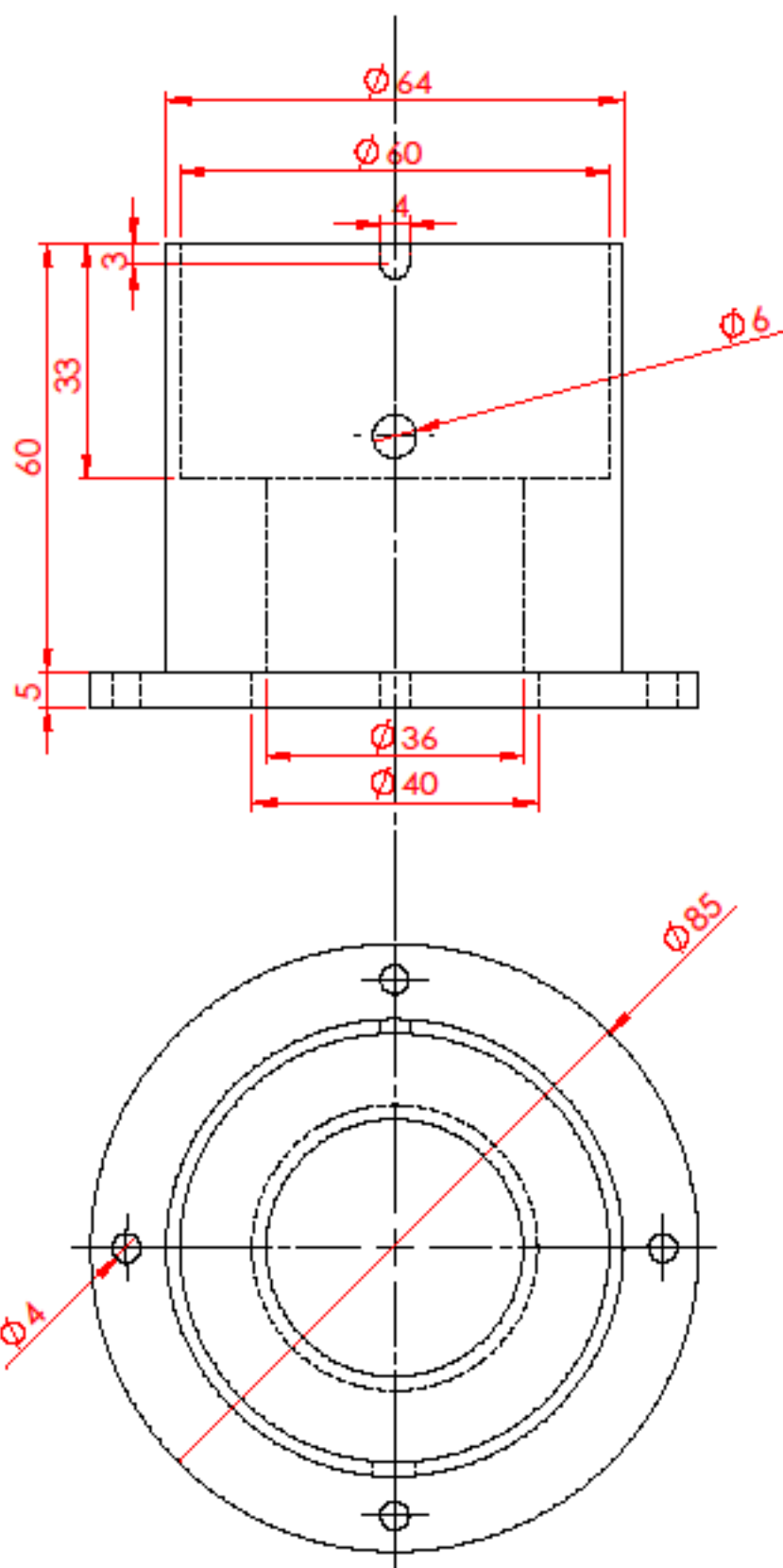
DES. Nº

003

A4

ESCALA 2:1

FOLHA 1 DE 1



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

ACABAMENTO:

DEBUR AND
BREAK SHARP
EDGES

NÃO MUDAR A ESCALA DO DESENHO

REVISÃO

	NOME	ASSINATURA	DATA		
DES.	Murilo Cirilo				
VERIF.					
APROV.					
MANUF.					
QUANT.	1 Peça				
				MATERIAL:	
				Poliamida 6	
				PESO:	

título:

Copo Base

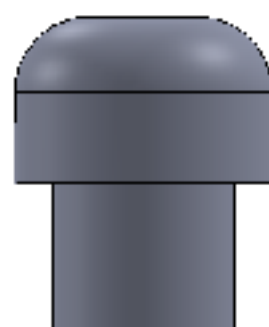
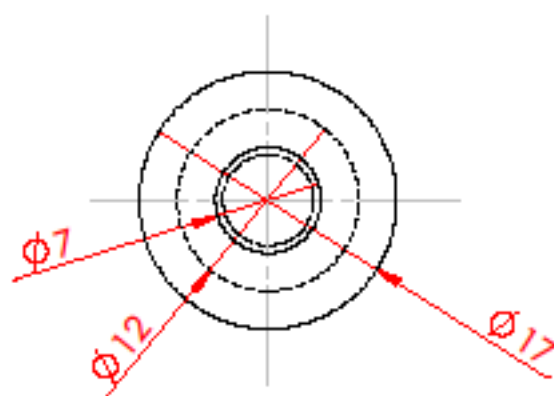
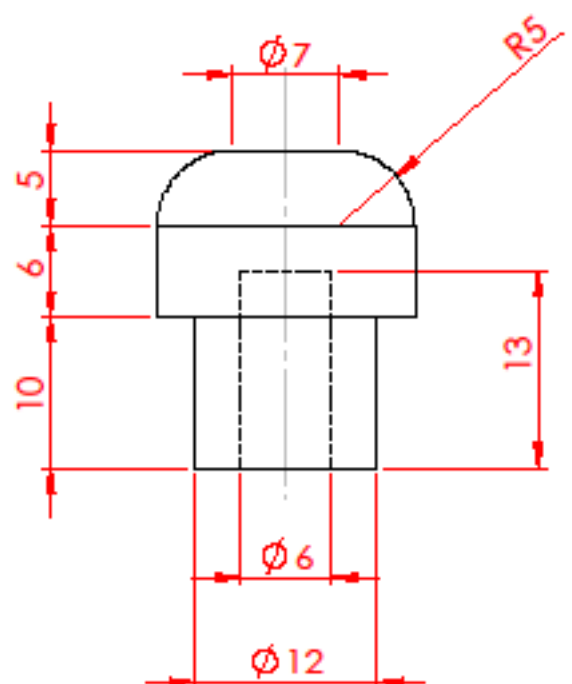
DES. Nº

004

A4

ESCALA:1:1

FOLHA 1 DE 1



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

ACABAMENTO:

DEBUR AND
BREAK SHARP
EDGES

NÃO MUDAR A ESCALA DO DESENHO

REVISÃO

	NOME	ASSINATURA	DATA		
DES.	Murilo Cirilo				
VERIF.					
APROV.					
MANUF.					
QUANT.	1 peça				

MATERIAL:

Poliamida 6

PESO:

título:

Apoio polegar

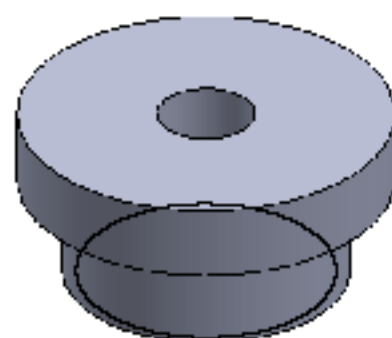
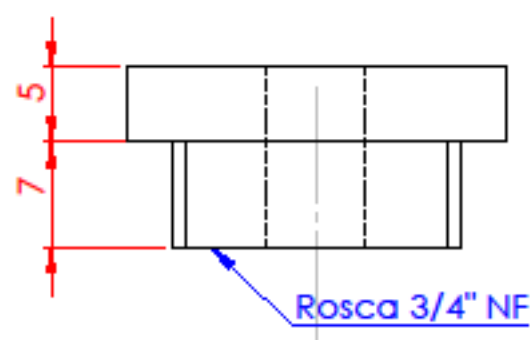
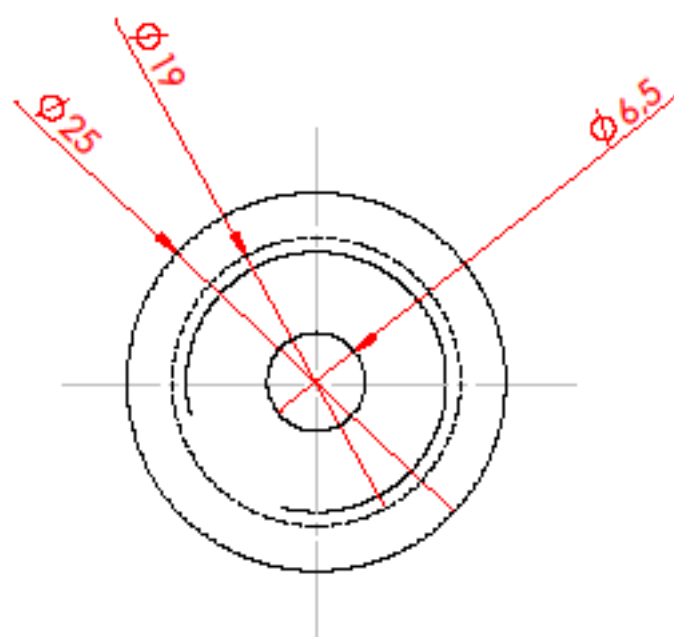
DES. Nº

005

A4

ESCALA 2:1

FOLHA 1 DE 1



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

ACABAMENTO:

DEBUR AND
BREAK SHARP
EDGES

NÃO MUDAR A ESCALA DO DESENHO

REVISÃO

	NOME	ASSINATURA	DATA		
DES.	Murilo Cirilo				
VERIF.					
APROV.					
MANUF.					
QUANT.	1 peça			MATERIAL:	
				Poliamida 6	
				PESO:	

título:

Tampa do copo

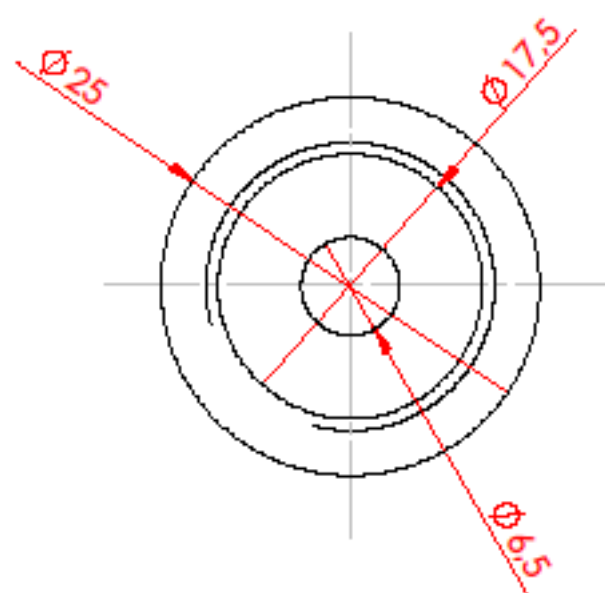
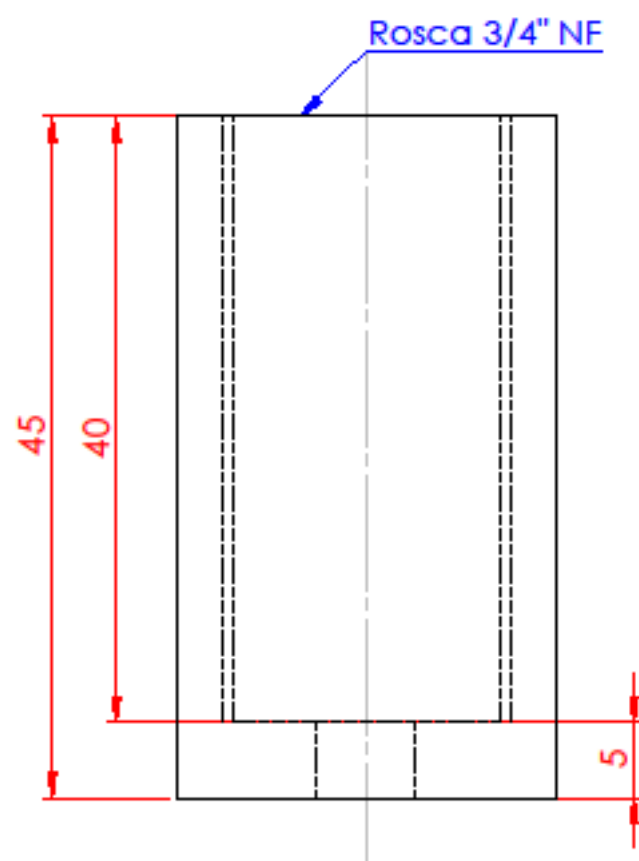
DES. Nº

006

A4

ESCALA 2:1

FOLHA 1 DE 1



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

ACABAMENTO:

DEBUR AND
BREAK SHARP
EDGES

NÃO MUDAR A ESCALA DO DESENHO

REVISÃO

	NOME	ASSINATURA	DATA		
DES.	Murilo Cirilo				
VERIF.					
APROV.					
MANUF.					
QUANT.	1 peça			MATERIAL:	
				Poliamida 6	
				PESO:	

título:

Copo

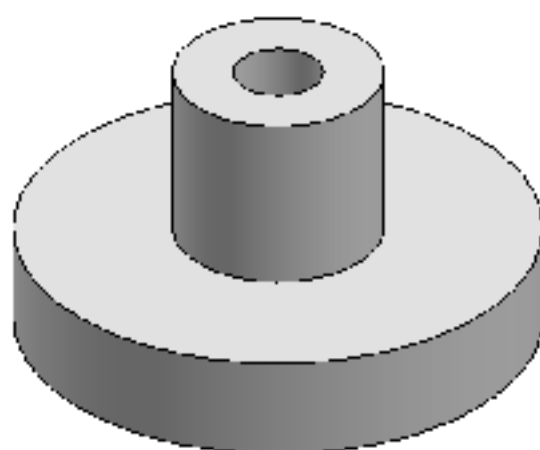
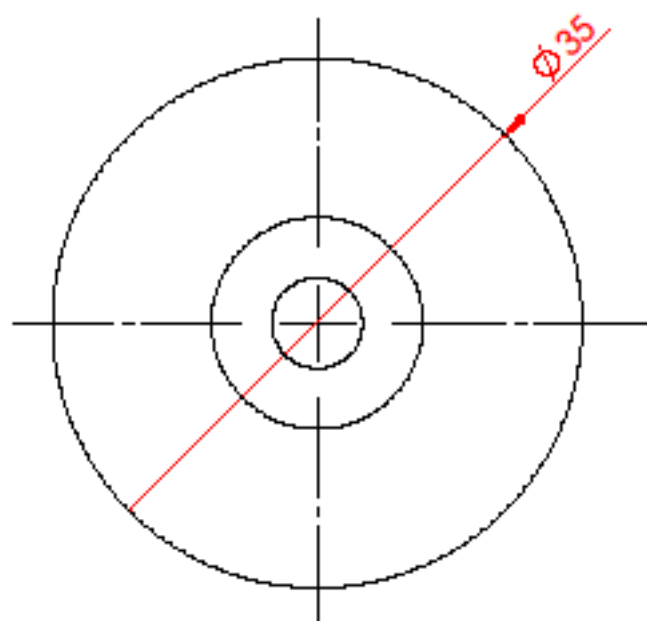
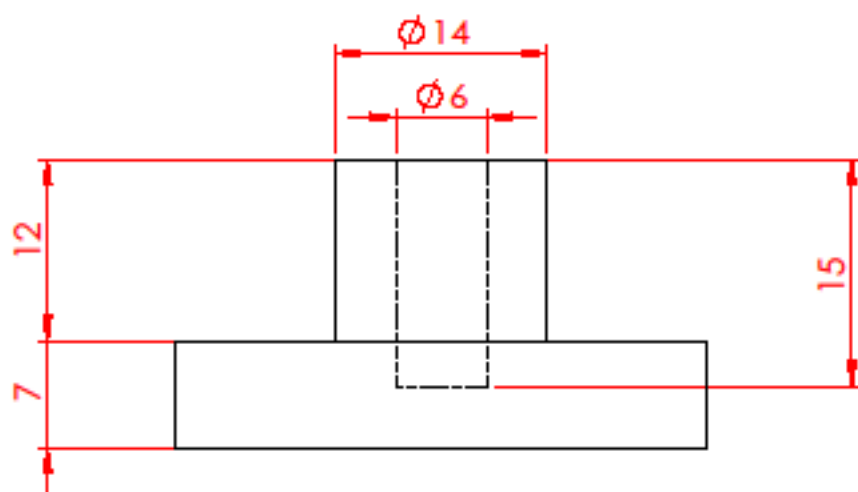
DES. Nº

007

A4

ESCALA:1:1

FOLHA 1 DE 1



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

ACABAMENTO:

DEBUR AND
BREAK SHARP
EDGES

NÃO MUDAR A ESCALA DO DESENHO

REVISÃO

DES. **Murilo Cirilo**

VERIF.

APROV

MANUP

QUANT. **1 peça**

MATERIAL:

Poliamida 6

PESO:

título:

Base impulsor da lamínula

DES. Nº

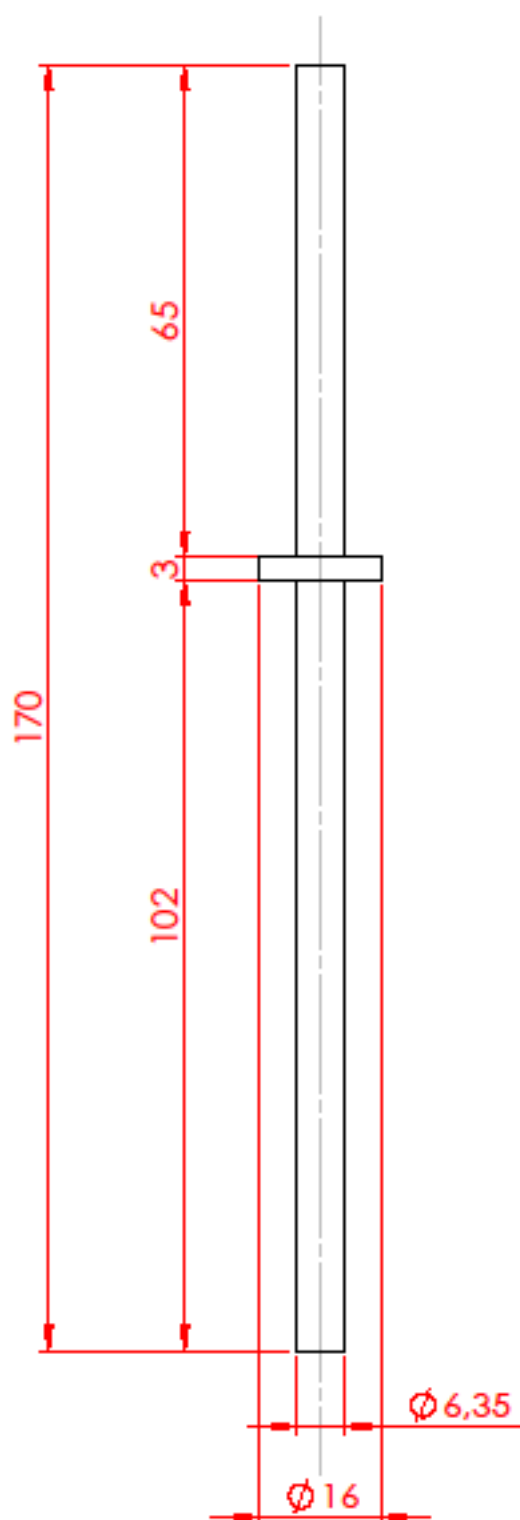
008

A4

ESCALA:1:1

b

FOLHA 1 DE 1



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

ACABAMENTO:

DEBUR AND
BREAK SHARP
EDGES

NÃO MUDAR A ESCALA DO DESENHO

REVISÃO

	NOME	ASSINATURA	DATA		
DES.	Murilo Cirilo				
VERIF.					
APROV.					
MANUF.					
QUALIC	1 Peça				

título:

Haste de movimentação

DES. Nº

009

A4

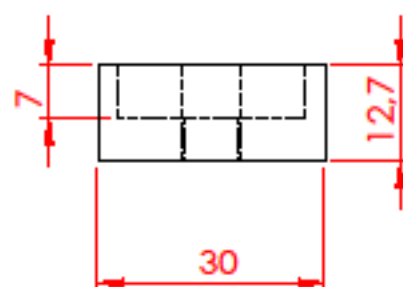
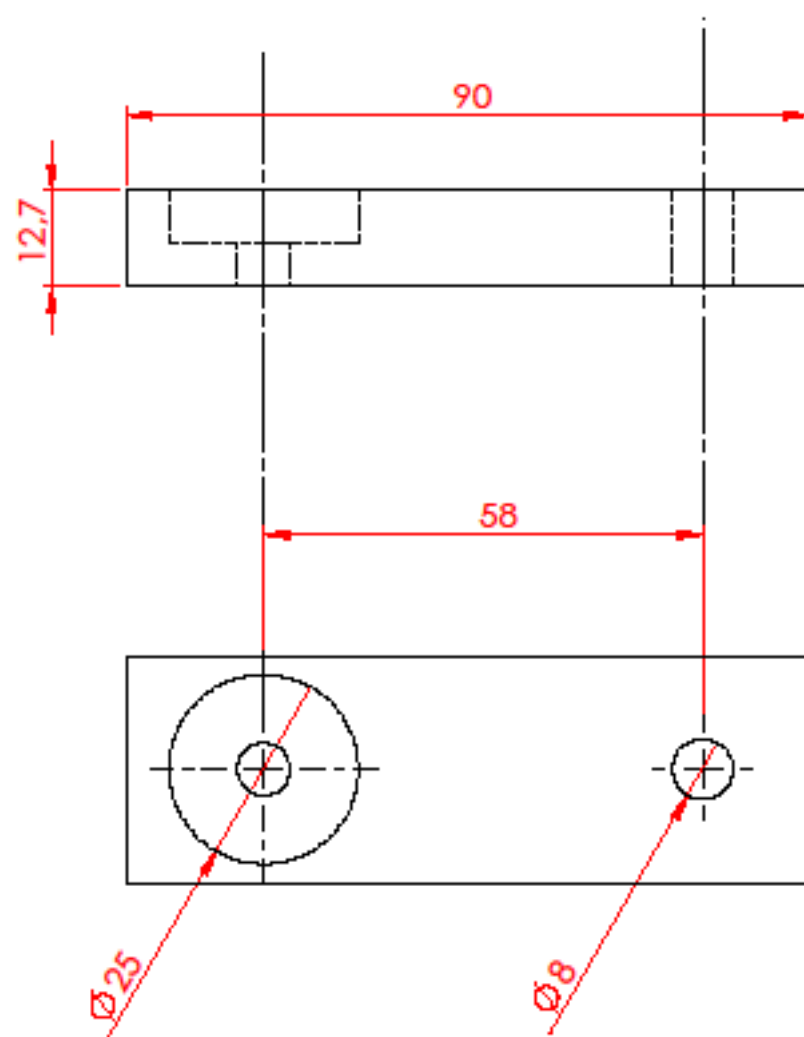
MATERIAL:

Aço ABNT 1010 - 1020

PESO:

ESCALA:1:1

FOLHA 1 DE 1



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

ACABAMENTO:

DEBUR AND
BREAK SHARP
EDGES

NÃO MUDAR A ESCALA DO DESENHO

REVISÃO

	NOME	ASSINATURA	DATA		
DES.	Murilo Cirilo				
VERIF.					
APROV.					
MANUF.					
QUANT.	1 Peça			MATERIAL:	
				Poliamida 6	
				PESO:	

título:

Base do conjunto de fixação da lamínula

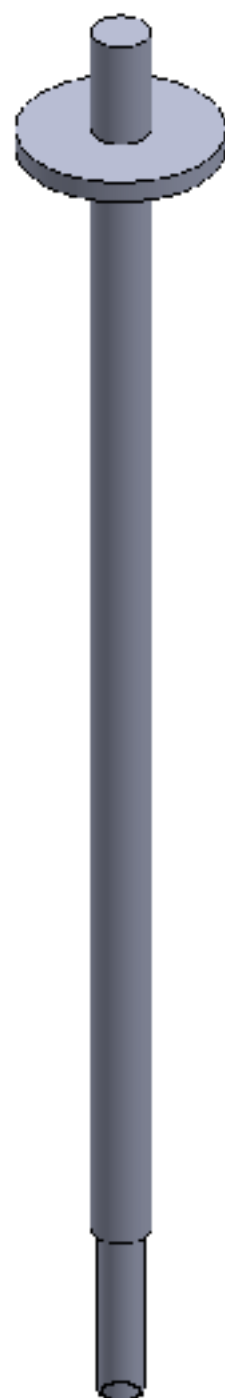
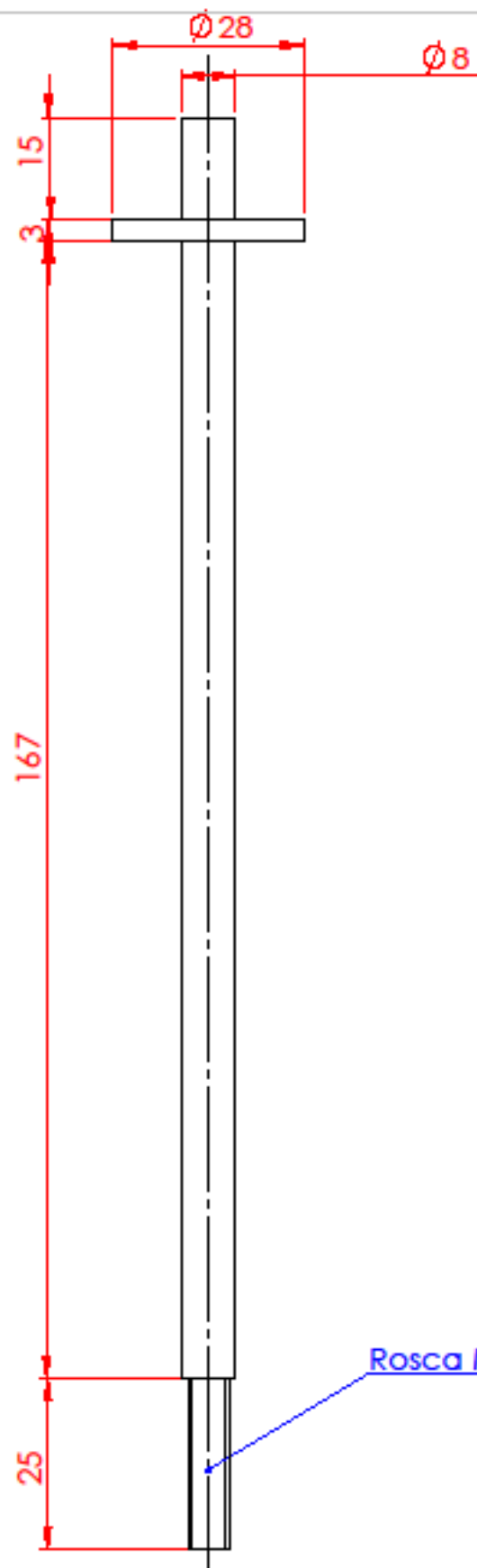
DES. Nº

010

A4

ESCALA:1:1

FOLHA 1 DE 1



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

ACABAMENTO:

DEBUR AND
BREAK SHARP
EDGES

NÃO MUDAR A ESCALA DO DESENHO

REVISÃO

	NOME	ASSINATURA	DATA		
DES.	Murilo Cirilo				
VERIF.					
APROV.					
MANUF.					
QUANT.	1 peça			MATERIAL:	
				Aço ABNT 1010 - 1020	
				PESO:	

título:

Haste de fixação

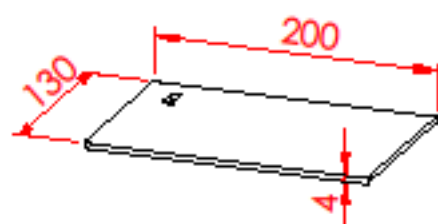
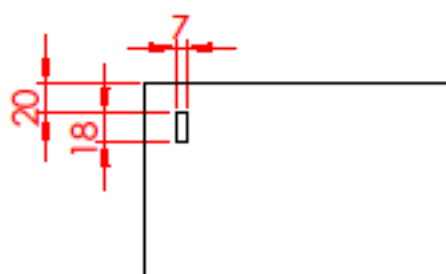
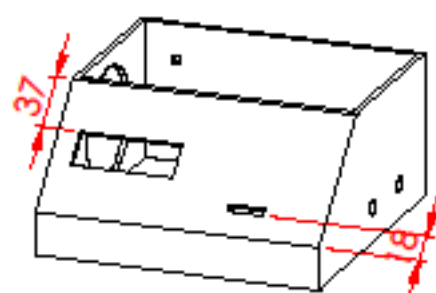
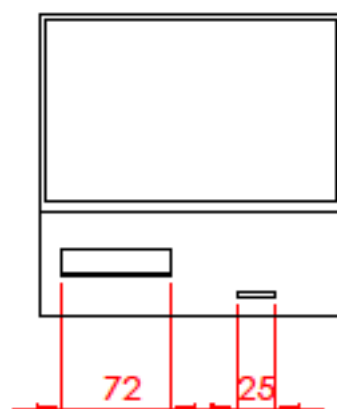
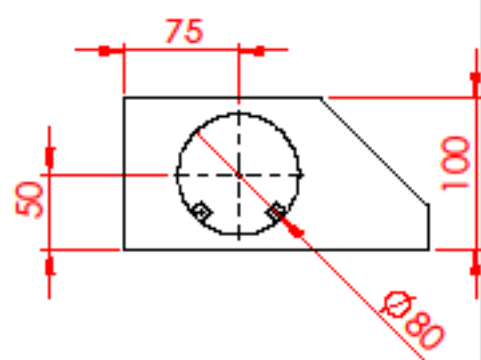
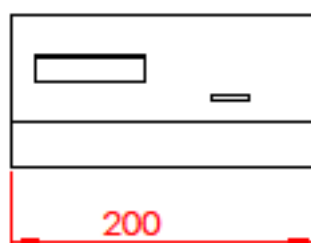
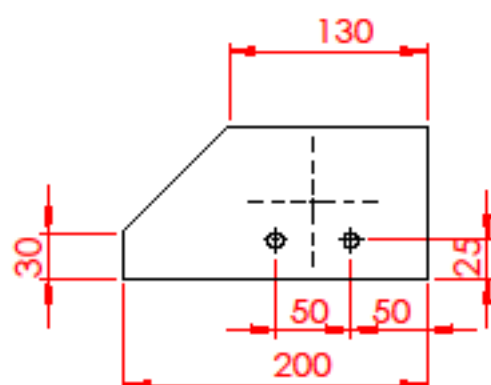
DES. Nº

011

A4

ESCALA:1:1

FOLHA 1 DE 1



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

ACABAMENTO:

DEBUR AND
BREAK SHARP
EDGES

NÃO MUDAR A ESCALA DO DESENHO

REVISÃO

	NOME	ASSINATURA	DATA		
DES.	Murilo Cinilo				
VERIF.					
APROV.					
MANUF.					
QUANT.	1 Peça			MATERIAL:	
				Poimetilmetacrilato	
				PESO:	

titulo: Case	DES. Nº 012	A4
ESCALA:1:5	FOLHA 1 DE 1	

APÊNDICE B - CÁLCULOS REFERENTES

Este apêndice demonstra cálculos necessários em algumas peças que sofrem uma solicitação maior de carga. Todos os cálculos são referentes a esforços estáticos, não foram realizados cálculos de esforços dinâmicos, tendo em vista que não é o objetivo deste trabalho.

O Apêndice B demonstra os cálculos referentes a seguintes peças: mola helicoidal, haste de movimentação, base do conjunto de fixação da lamínula, haste de fixação e conjunto motor elétrico redutor.

B.1 MOLA HELICOIDAL

Descrito no tópico 3.1.5, foi necessária a confecção de uma mola helicoidal para que a haste de movimentação retornasse à sua posição inicial, portanto, trata-se de uma mola de compressão. A mola foi confeccionada com material ASTM A228-51.

A mola confeccionada possui um total de 6,5 espiras, sendo as suas extremidades planas e fechadas, portanto o número de espiras ativas é de 4,5. O fio da mola possui um diâmetro de 1 *mm*. O diâmetro médio da mola é de 15 *mm*. A mola apresenta um comprimento livre de 20 *mm*.

Assim, foi possível estimar vários dados importantes como o comprimento sólido da mola, o passo espiral da mola, a constante da mola, a resistência de escoamento torcional do fio, entre outros.

O comprimento sólido da mola (L_s) é o produto do número ativo de espiras pelo diâmetro do fio, no caso o comprimento sólido da mola é de 4,5 *mm*.

O passo espiral da mola para as extremidades planas e fechadas de acordo Budynas (2009), é descrita pela Equação (05). Para a mola confeccionada o passo espiral da mola é de 4,4444 *mm*.

$$p = \frac{l_o - 3d}{n_a} \quad (05)$$

Na qual:

p , passo espiral da mola [*mm*];

l_o , comprimento livre da mola [*mm*];

d , diâmetro do fio [*mm*];

n_a , número de espiras ativas.

O aço ASTM A228-51 apresenta módulo de elasticidade transversal de 81,7 *GPa*. A constante elástica da mola pode ser calculada através da Equação (06). Seu valor calculado é de 0,6724 *N.mm⁻¹* (BUDYNAS, 2009).

$$k = \frac{d^4 G}{8D^3 n_a} \quad (06)$$

Na qual:

k , constante elástica da mola [*N.mm⁻¹*];

d , diâmetro do fio [*mm*];

G , módulo de elasticidade transversal [*GPa*];

D , diâmetro médio da mola [*mm*];

n_a , número de espiras ativas.

A resistência ou escoamento torcional do fio é dada pela Equação (07) (BUDYNAS, 2009).

$$S_{ut} = \frac{A}{d^m} \quad (07)$$

Na qual:

S_{ut} , resistência de escoamento torcional do fio [*MPa*];

A , constante de resistência do fio [*MPa.mm^m*];

d , diâmetro do fio [*mm*];

m , constante de declividade.

De acordo com Budynas (2009), o aço ASTM A228-51 apresenta constantes como o declividade m igual a 0,145, e a constante A de 2211 *MPa.mm^m*. A tensão torcional admissível máxima (S_{sy}) para o caso é 45% da resistência ao escoamento torcional do fio, portanto, a resistência ao escoamento torcional admissível máxima para a mola é de 994,85 *MPa*.

Quanto maior a inclinação da espira em conjunto com sua curvatura, maior será a tensão de cisalhamento, portanto, sendo necessário calcular o índice de curvatura. O índice de curvatura é obtido dividindo-se o diâmetro médio da mola pelo diâmetro do fio, no caso, o índice de curvatura da mola confeccionada é de 15.

Deve-se calcular o fator de curvatura para corrigir o efeito da tensão de cisalhamento direto, através do fator Bergstrasser, conforme a Equação (08), sendo que o mesmo é adimensional. O fator Bergstrasser calculado foi de 1,0877 (BUDYNAS, 2009).

$$k_b = \frac{4C + 2}{4C - 3} \quad (08)$$

Na qual:

k_b , fator Bergstrasser;

C , índice de curvatura da mola.

A carga estática correspondente à resistência ao escoamento é dada pela Equação (09). Portanto a mola confeccionada suporta uma carga máxima de 23,9475 N sem que seu material escoe (BUDYNAS, 2009).

$$F = \frac{\pi d^3 S_{sy}}{8K_b D} \quad (09)$$

Na qual:

F , força de resistência ao escoamento [N];

d , diâmetro do fio [mm];

S_{sy} , tensão torcional admissível máxima [MPa];

k_b , fator Bergstrasser;

D , diâmetro médio da mola [mm].

A tensão de cisalhamento máxima da mola sem que o material escoe é calculada através da Equação (10), o seu valor calculado foi de 945,2181 MPa (BUDYNAS, 2009).

$$\tau = \left(\frac{2C+1}{2C} \right) \left(\frac{8FD}{\pi d^3} \right) \quad (10)$$

Na qual:

τ , tensão de cisalhamento máxima [*N*];

C , índice de curvatura da mola;

F , força de resistência ao escoamento [*N*];

D , diâmetro médio da mola [*mm*];

d , diâmetro do fio [*mm*].

Devido ao fato de que a mola confeccionada tem um pequeno comprimento (20 *mm*), portanto, não foi realizado cálculo de flambagem, pois a mola é alojada dentro do copo. Outro fator a ser observado é que a mola não sofrerá compressão máxima, devido ao fato que a base impulsora da lamínula se encontra próxima à ventosa, como pode ser observado na Figura 19.

B.2 CÁLCULO DE RESISTÊNCIA DA HASTE DE MOVIMENTAÇÃO

A haste de movimentação sofre uma carga axial de compressão, porém pode ocorrer um colapso sem que o material tenha chegado ao seu limite de escoamento, e este colapso acontece na direção onde houver menor momento de inércia da seção transversal da peça (BEER, 1995).

De acordo com Beer (1995), a carga crítica de flambagem pode ser calculada pela seguinte equação:

$$P_{CR} = \frac{\pi^2 EI}{L_E^2} \quad (11)$$

Na qual:

P_{CR} , carga crítica de flambagem [*N*];

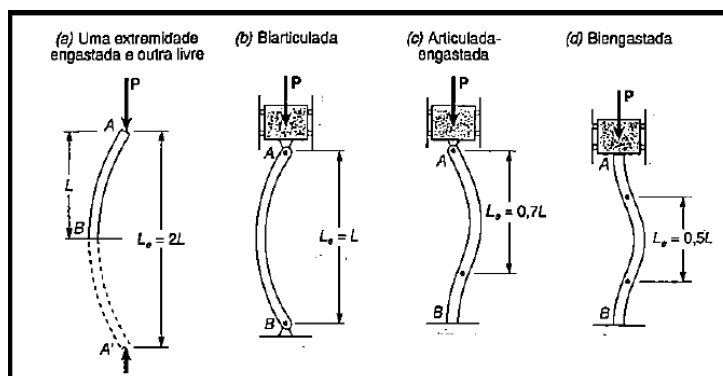
E , módulo de elasticidade [*Pa*];

I , momento de inércia para seção circular [*m*⁴];

L_E , comprimento livre da flambagem [*m*].

Há diversos tipos de fixação nas extremidades, a Figura 36 demonstra os comprimentos efetivos de flambagem para as devidas fixações.

Figura 36 - Comprimento efetivo de flambagem.

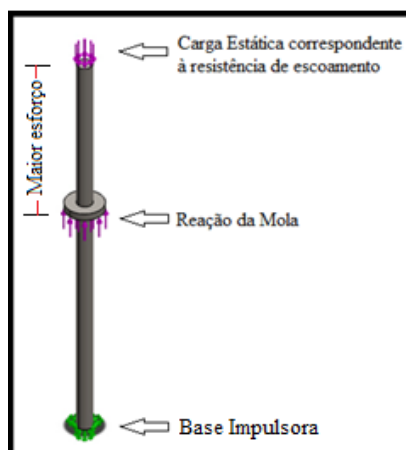


Fonte: Beer (1995).

A haste de movimentação tem um comprimento total de 170 mm. Para a combinação de menor altura, a haste tem curso máximo de 16 mm, até que seja fixada a lamínula à ventosa, assim a mola helicoidal sofrerá um esforço máximo de 7,4480 N (constante elástica encontrada no tópico B.1). Foi estimado que a força aplicada para fixar a lamínula à ventosa é de aproximadamente de 5 N, assim, deverá ser aplicado um esforço máximo na parte superior da haste de movimentação de 12,4480 N.

Descrito no tópico anterior (B.1) a carga máxima aplicada na mola à resistência de escoamento é de 23,9475 N, sendo este esforço adotado como fator limite de cálculo para a flambagem, a Figura 37 demonstra a parte que sofre maior esforço, sendo o objeto de cálculo.

Figura 37 - Esforços da haste de movimentação.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Sabe-se que o módulo de inércia para seção circular de um diâmetro (d) conhecido é dado pela Equação (12):

$$I = \frac{\pi d^4}{64} \quad (12)$$

Na qual:

I , momento de inércia para seção circular [m^4];

d , diâmetro da haste [m].

A parte da peça que sofre maior esforço, suporta uma carga máxima crítica de flambagem de 8730,5296 N , contra a carga máxima aplicada na mola à resistência de escoamento de 23,9475 N , portanto a peça suporta bem ao esforço considerado.

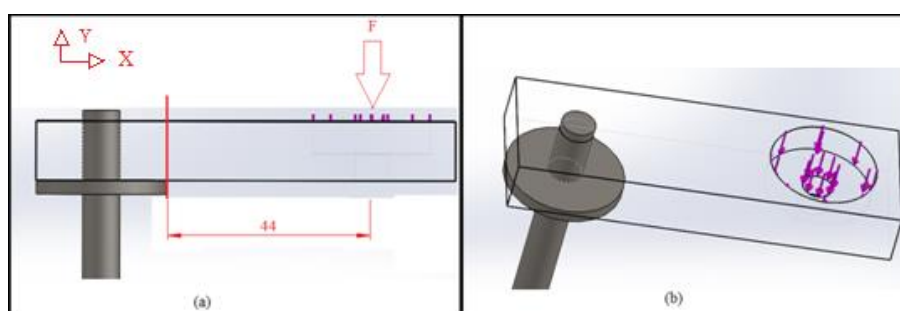
B.3 CÁLCULO DE RESISTÊNCIA DO CONJUNTO DE FIXAÇÃO

A base do conjunto de fixação da lamínula sofre esforço de flexão, pois a mesma apoia o copo, o copo por sua vez recebe esforço da mola, este se encontra na superfície de rebaixo da peça, é representado na Figura 38 (a).

Sabendo-se que a força peso aplicada na superfície de rebaixo da peça é de 1,1521 N . A carga máxima aplicada na mola à resistência de escoamento é de 23,9475 N , sendo assim o esforço adotado como fator limite de cálculo para a flexão da peça é de 25,0996 N .

A situação mais crítica de flexão da peça se encontra ao término de seu apoio, representado na Figura 38 (b), portanto o momento gerado (M) é de 1,1044 $N.m$, no eixo X da peça.

Figura 38 - Esforços Atuantes.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

De acordo com Beer (1995), para o dimensionamento de peças sujeitas a flexão, é empregada a tensão admissível de tração, que é a tensão atuante máxima, é dada pela Equação (13):

$$\sigma_x = \frac{M}{W_x} \quad (13)$$

Na qual:

σ_x , tensão admissível de tração [*Pa*];

M , momento [*N.m*];

W_x , módulo resistência [*m³*].

Sabe-se que o módulo resistência no eixo de uma seção retangular é dado pela Equação (14):

$$W_x = \frac{bh^2}{6} \quad (14)$$

Na qual:

W_x , módulo resistência [*m³*];

b , comprimento da peça [*m*].

h , altura da peça [*m*].

A tensão de resistência a tração da poliamida 6 é de 90 *MPa*. A peça suporta um momento máximo de 72,5805 *N.m*, contra a flexão aplicada de 1,1044 *Nm*.

B.4 CÁLCULO DE RESISTÊNCIA DA HASTE DE FIXAÇÃO

Como pode ser observado na Figura 40, há um carregamento excêntrico na haste de fixação. Assim, a haste de fixação deve suportar o esforço do peso de todo o conjunto, aproximadamente 1,4815 *N*, mais a carga de excêntrica de 25,0996 *N*. A distância entre a haste de fixação e a carga é de 58 *mm*, portanto, a haste de fixação sofre um momento fletor [$M_{máx}$] de 1,5417 *Nm*.

De acordo com Beer (1995), a tensão crítica de flambagem pode ser calculada pela Equação (15).

$$\sigma_{CR} = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{L_e}{i_{min}} \right)^2} \quad (15)$$

Na qual:

σ_{CR} , tensão crítica de flambagem [*N*];

E, módulo de elasticidade [*Pa*];

L_E, comprimento livre da flambagem [*m*].

i_{min}, raio mínimo de giração [*m*].

Como pode ser visto nas Figuras 18 e 19, a haste de fixação tem uma extremidade fixa e outra livre. O comprimento máximo da haste em carga axial é de 170 *mm*. A tensão admissível calculada é igual 290,1888 *MPa*.

Beer (1995) descreve em sua obra que a tensão admissível de flambagem não deve ser superior à tensão gerada pela carga excêntrica, essa tensão pode ser calculada pela Equação (16):

$$\sigma_{adm} \geq \frac{P}{A} + \frac{M_{max}c}{I} \quad (16)$$

Na qual:

σ_{adm} , tensão máxima admissível [*Pa*];

P, carga axial [*N*];

A, área da seção transversal [*m*²];

M_{max}, momento fletor máximo [*Nm*];

c, distância máxima entre a linha neutra e a fibra mais afastada da seção transversal [*m*];

I, momento de inércia para seção circular [*m*⁴].

Sabendo que:

$$\frac{M_{máx}C}{I} = \frac{M_{máx}}{W_x} \quad (17)$$

Substituindo e reescrevendo a Equação (17) na Equação (16), tem-se:

$$\sigma_{adm} \geq \frac{P}{A} + \frac{M_{máx}}{W_x} \quad (18)$$

Assim, o eixo de fixação suporta uma carga máxima excêntrica de 247,2285 *N*, contra a carga excêntrica de 26,5811 *N*.

B.5 CONJUNTO MOTOR ELÉTRICO-REDUTOR

Antes de selecionar o conjunto motor elétrico-redutor, foi necessário realizar alguns cálculos básicos fundamentais, como torque mínimo necessário e potência. Como mencionado no tópico 3.3.2 o protótipo irá trabalhar com as mesmas rotações de trabalho do separador de partículas rotativo convencional (RPD), as rotações de 70, 100, 130 e 200 RPM.

Através de uma balança de precisão da marca Marte, modelo AD5002, erro máximo $\pm 0,1$ *g*, resolução 0,01 *g*, faixa nominal de 0 a 5010 *g*, foram aferidos a massa de todas as combinações com a ventosa, e a massa da cúpula cônica com o seu respectivo parafuso de fixação.

A combinação com a ventosa de maior massa foi a combinação 01 com 43,86 *g*. A cúpula cônica e o seu parafuso de fixação uma massa de 38,41 *g*. Assim totalizando uma massa total 82,27 *g*. Portanto a força peso que será exercida no eixo do conjunto motor elétrico redutor é de 0,8068 *N* (considerando a aceleração da gravidade igual a 9,80665 *m.s*⁻²).

Assim o eixo do conjunto motor elétrico redutor terá que exercer um torque mínimo superior de 0,0226 *m.N* em todas as rotações de trabalho.

A potência do conjunto motor elétrico redutor não poderá ser inferior à potência requerida para as condições de trabalho (varia de 70 a 200 RPM), portanto é necessário calcular a potência para cada rotação.

Potência é a capacidade de um objeto de realizar trabalho em um intervalo de tempo. De acordo com Budynas (2009) a potência é o produto do torque pela velocidade angular. A Tabela 19 demonstra a potência mínima para cada rotação de trabalho.

Tabela 19 - Potência mínima.

Relação rotação e potência			
Rotação (RPM)	ω (rad/s)	Torque (m.N)	Potência (W)
70	7,3304	0,0226	0,1656
100	10,4720	0,0226	0,2366
130	13,6136	0,0226	0,3075
200	20,9440	0,0226	0,4731
230	24,0855	0,0226	0,5441

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Baseado nestes dados descritos acima foi feita uma pesquisa de mercado sobre conjunto motor elétrico-redutor que atendesse o projeto, assim foi selecionado o modelo AK280/1.1PF5R193SC da marca Akiyama Motors (citado no tópico. 3.3.4).

APÊNDICE C - ALGORITMO DE PROGRAMAÇÃO DO ARDUINO

Este apêndice demonstra o algoritmo realizado para o projeto em linguagem C++, utilizando o *software* Arduino 1.0.6.

Após alguns comandos há o símbolo "//", para o *software* este é um comando para adicionar comentários. Os comentários foram feitos para ajudar interpretar o algoritmo.

```
//Programação do Projeto
#include <Wire.h> // Biblioteca Display
#include <LiquidCrystal_I2C.h> // Biblioteca Módulo I2C
#include <AFMotor.h> // Biblioteca Motor Shied
#include <Keypad.h> // Biblioteca Teclado

AF_DCMotor motor(1); //Porta selecionada da Motor Shield M1

LiquidCrystal_I2C lcd(0x20,16,2); // Define o endereço LCD de 0x20 para um display de 16
caracteres e 2 linhas

const byte ROWS = 4; //Quantidade de linhas do teclado
const byte COLS = 4; //Quantidade de colunas do teclado
//Mapas das teclas do teclado:
char hexaKeys[ROWS][COLS] = {
  {'1','2','3','A'},
  {'4','5','6','B'},
  {'7','8','9','C'},
  {'*','0','#','D'}
};

byte rowPins[ROWS] = {33, 35, 37, 39}; //Portas ligadas a linhas
byte colPins[COLS] = {41, 43, 45, 47}; //Portas ligadas a colunas

//Ativa o teclado
Keypad customKeypad = Keypad( makeKeymap(hexaKeys), rowPins, colPins, ROWS,
COLS);
```



```

void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  lcd.init();           // Inicializa o LCD
  lcd.backlight(); //Imprimir uma mensagem para o LCD.
}

void loop()
{
  char customKey = customKeypad.getKey();
  delay (100);
  if (customKey=='A'){
    motor.setSpeed(78); //Define a velocidade maxima
    motor.run(BACKWARD); //Gira o motor sentido horário
    lcd.print("Velocidade Atual:");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("    70 rpm    ");
    lcd.setCursor(1, 1);}

  if (customKey=='B'){
    motor.setSpeed(111); //Define velocidade baixa
    motor.run(BACKWARD); //Gira o motor sentido anti-horario
    lcd.print("Velocidade Atual:");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("   100 rpm   ");
    lcd.setCursor(1, 1);}

  if (customKey=='C'){
    motor.setSpeed(144); //Define velocidade baixa
    motor.run(BACKWARD); //Gira o motor sentido anti-horário
    lcd.print("Velocidade Atual:");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("   130 rpm   ");
    lcd.setCursor(1, 1);}

```

```

if (customKey=='D'){
motor.setSpeed(221); //Define velocidade baixa
motor.run(BACKWARD); //Gira o motor sentido anti-horário
lcd.print("Velocidade Atual:");
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("    200 rpm    ");
lcd.setCursor(1, 1);}

```

```

if (customKey=='1'){
motor.setSpeed(255); //Define velocidade baixa
motor.run(BACKWARD); //Gira o motor sentido anti-horário
lcd.print("Velocidade Atual:");
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print(" Rotacao alta - AH ");
lcd.setCursor(1, 1);}

```

```

if (customKey=='2'){
motor.setSpeed(255); //Define velocidade baixa
motor.run(FORWARD); //Gira o motor sentido horário
lcd.print("Velocidade Atual:");
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print(" Rotacao alta - H ");
lcd.setCursor(1, 1);}

```

```

if (customKey=='*'){
motor.setSpeed(0);
motor.run(RELEASE); //Desliga o motor
lcd.print("-----PAUSA-----");
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("0 rpm");
lcd.setCursor(1, 1);}
}

```

APÊNDICE D - TABELAS DE DEMOSNTRATIVOS DE CUSTOS

Este apêndice demonstra todos os itens que foram adquiridos e seus respectivos valores para o presente trabalho.

Os componentes elétricos e eletrônicos necessários adquiridos para a construção do protótipo, encontram-se na Tabela 20.

Tabela 20 - Componentes elétricos e eletrônicos adquiridos para construção do protótipo.

Componentes elétricos e eletrônicos adquiridos para o projeto				
Nº	Item	Unidades	Quantidade	Preço (R\$)
1	Arduino Mega 2560 R3 com cabo USB	1	1	99,90
2	Motor Shield L293D Driver Ponte H para Arduino	1	1	34,90
3	Fonte 9V 1A Bivolt	1	1	16,90
4	Fonte 12V 1,5A Bivolt	1	1	20,00
5	Módulo Serial I2C modelo GY-IICLCD	1	1	19,90
6	Display LCD 16x2 RT162-7	1	1	18,90
7	Teclado Matricial de Membrana 16 Teclas	1	1	15,90
8	Ferro de Solda de 25W 220V HIKARI- POWER30	1	1	30,00
9	Tubo Solda Best Sn63/Pb37 Fio 1mm 25g 4m	1	1	7,90
10	Barra de Pino 1x40 90°	40	1	1,90
11	Barra de Pino 1x40 180°	40	1	1,90
12	Multímetro Digital Minipa ET-1100	1	1	69,90
13	Cabo Fio PP Flexível Extensão 2x1,5 mm x 2m	1	1	3,50
14	Régua Extensora 2 Tomadas	1	1	8,50
15	Plugue 180° de 10A	1	1	4,65
16	Botão Interruptor ON/OFF 10A/250V	1	1	8,00
17	Cooler 12V 0,16a	1	1	12,50
18	Kit Jumpers Macho-Fêmea	40	1	19,90
19	Kit Jumpers Macho-Macho	40	1	19,90
20	Fio Pompéia 2x1mmx1,5m	1	1	1,50
21	Fita Isolante Preta 20 Metros - 19 mm x 0,13 mm	1	1	2,50
22	Motor Elétrico-Redutor	1	1	39,90
Subtotal (R\$)				458,85
Frete (R\$)				41,10
Deslocamento (R\$)				12,75
Total (R\$)				512,70

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Os componentes necessários adquiridos para a confecção do case de polimetilmetracrilato para alojar os componentes elétricos e eletrônicos e a base suporte rotativo, encontram-se na Tabela 21.

Tabela 21 - Case de polimetilmetracrilato e base suporte rotativo.

Case de polimetilmetracrilato e base suporte rotativo				
Nº	Item	Unidades	Quantidade	Preço (R\$)
1	Placas de Polimetilmetracrilato	1	1	110,00
2	Dobradiça Metálica 40x40	2	1	2,50
3	Puxador Metálico	1	1	1,50
4	Parafuso Sextavado 3/16"x1" com Porca e Arruela	10	1	0,75
5	Parafuso Cabeça Chata Philips 3,5 x 25 mm	14	1	1,70
6	Chapa MDF 20 x 10 x 0,8 cm	1	1	20,00
7	Adesivo Instantâneo 793 100g TEKBOND	1	1	21,00
Subtotal (R\$)				157,45
Deslocamento (R\$)				6,85
Total (R\$)				164,30

Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Tabela 22, demonstra os materiais adquiridos para usinagem para a construção do protótipo.

Tabela 22 - Materiais adquiridos para usinagem.

Materiais adquiridos para usinagem				
Nº	Item	Medidas (mm)	Quantidade	Preço (R\$)
1	Tarugo de Poliamida 6	Ø100 mm x 1000 mm	1	310,00
2	Tarugo de Bronze TM23	Ø25 mm x 1000 mm	1	280,00
3	Tarugo de Aço 1020	Ø 19 mm x 400 mm	1	6,50
Subtotal (R\$)				596,50
Deslocamento (R\$)				8,75
Total (R\$)				605,25

Legenda: Ø - Diâmetro.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Tabela 23, demonstra o custo dos serviços de usinagem necessários para a construção do protótipo.

Tabela 23 - Serviço de usinagem

Serviço de usinagem				
Nº	Item	Preço Hora (R\$)	Quantidade (horas)	Preço (R\$)
1	Anéis e Cilindros de Bronze TM23 Tamanhos Diversos	80,00	1,6	128,00
2	Anéis e Cilindros de Aço 1020 Tamanhos Diversos	80,00	0,75	60,00
3	Suportes para Ímã de Poliamida 6	80,00	1,4	112,00
4	Suporte para o Motor Elétrico de Poliamida 6	80,00	2	160,00
5	Conjunto Completo da Haste de Poliamida 6 e Eixo de Aço 1020	80,00	4	320,00
6	Cúpula para o Motor Elétrico de Poliamida 6	80,00	1,25	100,00
7	Copo de Apoio para Conjunto Rotativo de Poliamida 6	80,00	1,5	120,00
			Subtotal (R\$)	1000,00
			Deslocamento (R\$)	12,55
			Total (R\$)	1012,55

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Houve a necessidade de aquisição de equipamentos, a Tabela 24 demonstra o seu custo.

Tabela 24 - Equipamentos adquiridos para projeto

Equipamentos adquiridos para projeto				
Nº	Item	Capacidade	Quantidade	Preço (R\$)
1	Gaussímetro	TLMP - HALL-10 10.000 Gauss	1	2098,95
2	Tacômetro	Nicetu TC802 - 0,1 à 9999 RPM	1	137,20
			Subtotal (R\$)	2236,15
			Frete (R\$)	49,24
			Total (R\$)	2285,39

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Também exposto no item 3.5, a tabela 25 demonstra o custo dos ímãs adquiridos para a realização dos ensaios.

Tabela 25 - Custo dos ímãs adquiridos para o projeto

Ímãs adquiridos para o projeto					
Nº	Item	Medidas (mm)	Unidades	Quantidade	Preço (R\$)
1	Ímã de Neodímio N35 Níquel Anel	Øext 19 x Øint 14 x h 10	2	1	16,50
2	Ímã de Neodímio N35 Níquel Anel	Øext 9 x Øint 3 x h 10	2	1	13,50
3	Ímã de Neodímio N42 Níquel Cilindro	Ø 6 x h 10	2	1	16,50
4	Ímã de Neodímio N45 Níquel Anel	Øext 12 x Ø 9 x h 1,5	10	1	37,00
5	Ímã de Neodímio N45 Níquel Cilindro	Ø 3 x 1,5	10	1	9,50
6	Ímã de Neodímio N35 Níquel Cilindro	Ø 16 x h 5	5	1	19,90
7	Ímã de Ferrite Cilindro	Ø 16 x h 5	10	1	15,50
Subtotal (R\$)					128,40
Frete (R\$)					18,76
Total (R\$)					147,16

Legenda:

Øext - Diâmetro externo; Øint - Diâmetro interno; Ø - Diâmetro; h - Altura.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

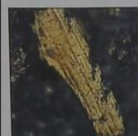
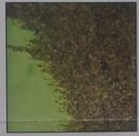
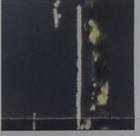
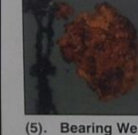
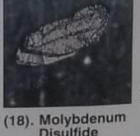
Como demonstrado nas tabelas 20 a 25, o custo total entre aquisição de equipamentos necessários até a confecção do protótipo foi de R\$ 4727,35.

Não foram computados custos de desenvolvimento do projeto e de análise dos ferrogramas, pois é necessário realizar estudos complexos para estimar valores, devido ao fato que todas as etapas descritas no presente trabalho levaram mais de ano para ser realizadas.

ANEXO A - PARTÍCULAS DE DESGASTE EM FERROGRAFIAS

Este anexo demonstra (Figura 39) as típicas partículas de desgaste que são encontradas em ferrografias.

Figura 39 - Típicas partículas de desgaste

 www.predictinc.com 			TYPICAL FERROGRAPHIC WEAR PARTICLES 95% of your ferrogram analysis can be identified on this chart.					
Actual Photos	Description	Examples of Causes	Actual Photos	Description	Examples of Causes	Actual Photos	Description	Examples of Causes
	Flat platelets < 15 microns in major dimension. Magnification 500x	Normal machine wear.		Black particles aligned in magnetic field. Magnification 500x	Insufficient lubrication.		Non-aligned and passes transmitted light. Magnification 100x	Possible paper filter failure.
(1). Normal Rubbing Wear			(7). Black Oxides			(13). Fibers		
	Flat elongated particles > 20 microns with striations. Magnification 500x	Excessive load/speed on sliding surface. This example is composed of copper alloy.		Red-orange particles aligned in magnetic field. Magnification 1000x	Water in the oil or poor lubricant condition.		Amorphous materials which pass transmitted light. Magnification 500x (red filter)	Excessive load or stress on lubricant.
(2). Severe Sliding Wear			(8). Red Oxides			(14). Friction Polymers		
	Long, curled strips of metal. Heat treated Magnification 500x	Misalignment or abrasive contamination in lubricant.		Heavy concentration of fine particles at exit of ferrogram. Magnification 100x	Oil additive depletion.		Long, thin, bar shaped particles. Magnification 1000x	New machinery.
(3). Cutting Wear			(9). Corrosive Wear			(15). Break-in Wear		
	Flat striated particles. Heat treated Magnification 500x	Fatigue, scuffing or scoring of gear teeth.		White metal particle misaligned with magnetic field. Magnification 500x	Aluminum component wear.		Heat treated ferrogram (330°C/625°F) show both purple and blue temper colors indicating case hardened and low alloy steel respectively. Magnification 400x	Abnormal gear wear.
(4). Gear Wear			(10). Aluminum Particle			(16). Case Hardened and Low Alloy Steel Particles		
	Laminar platelets. Heat treated Magnification 500x	Rolling contact failure.		Particles appear as gray sliding or gear wear particles under reflected light. White transmitted light shows these particles are translucent red. Magnification 100x	Poor lubrication conditions.		Nonferrous - before and after heat treatment. Magnification 500x	Babbitt journal bearing wear.
(5). Bearing Wear			(11). Beta Red Oxides			(17). Lead/Tin Babbitt		
	Small spheres < 5 microns in diameter. Magnification 1000x	Early warning of rolling element bearing failure.		Foreign particles of material not characteristic of machine or oil. Magnification 100x	Outside contaminants. Usually sand, dust or dirt.		Nonferrous particle, gray in color with many shear planes. Magnification 400x	Solid lubricant additive in system.
(6). Spheres			(12). Dust/Dirt			(18). Molybdenum Disulfide		
 CONDITION MONITORING SERVICES			9555 Rockside Road, Suite 350 Cleveland, OH 44125-6231 (800) 543-8786 • FAX: (216) 642-1484			ISO 9001 Certified		

Fonte: Elaboração do próprio autor.