

Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”
Faculdade de Engenharia – Campus de Ilha Solteira
Programa de Pós – Graduação em Engenharia Mecânica

Dissertação de mestrado

DESENVOLVIMENTO DE UM TRIBÔMETRO, TIPO CILINDRO SOB
DISCO, PARA ENSAIOS TRIBOLÓGICOS EM FORMULAÇÕES COM
ÓLEOS VEGETAIS.

Fernando Ribeiro Alves

Aparecido Carlos Gonçalves
Orientador

Ilha Solteira
2014

Fernando Ribeiro Alves

DESENVOLVIMENTO DE UM TRIBÔMETRO, TIPO CILINDRO SOB DISCO, PARA ENSAIOS TRIBOLÓGICOS EM FORMULAÇÕES COM ÓLEOS VEGETAIS.

Orientador: Prof. Dr. APARECIDO CARLOS GONÇALVES

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

Ilha Solteira
2014

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

- A474d Alves, Fernando Ribeiro.
Desenvolvimento de um tribômetro, tipo cilindro sob disco, para ensaios tribológicos em formulações com óleos vegetais / Fernando Ribeiro Alves . -- Ilha Solteira: [s.n.], 2014
132 f. : il.
- Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Mecânica dos Sólidos, 2014
- Orientador: Aparecido Carlos Gonçalves
Inclui bibliografia
1. Tribômetros. 2. Desgaste. 3. Partículas de desgaste. 4. Análise de Lubrificantes. 5. Biolubrificantes.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: Desenvolvimento de um tribômetro, tipo cilindro sob disco, para ensaios tribológicos em formulações com óleos vegetais

AUTOR: FERNANDO RIBEIRO ALVES

ORIENTADOR: Prof. Dr. 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. VICENTE AFONSO VENTRELLA
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. LUIZ EDUARDO DE ANGELO SANCHEZ
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru

Data da realização: 25 de julho de 2014.

Dedico

Ao meu pai José Roberto Alves e minha mãe Eunice Dionara Ribeiro Alves, por tudo de bom que me concederam até hoje, a minha namorada Paula Fernanda Dias por todo amor e confiança em mim e a meu irmão Renan Ribeiro Alves.

AGRADECIMENTOS

A Deus,

Sem ele não chegaria até aqui.

A toda a minha família e minha namorada,

Por me incentivarem e me darem força em minhas conquistas.

Ao professor Dr. Aparecido Carlos Gonçalves,

Por ter me dado à oportunidade de fazer parte de suas pesquisas, por toda a orientação dada e por confiar a mim.

A UNESP de Ilha Solteira,

Por todo auxílio dado.

Aos meus amigos Altair França de Araújo, Carlos Fernando Joventino,

Willians França Leite e Danilo Damasceno Sabino,

Que me apoiaram diretamente no mestrado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES,

Pelo suporte financeiro.

RESUMO

O aquecimento global e o meio ambiente são os temas mais preocupantes da atualidade. Com isso, inúmeras pesquisas estão em desenvolvimento a fim de encontrar meios para preservação dos mesmos de modo que as gerações futuras possam desfrutar da mesma qualidade de vida que temos hoje. Uma das grandes fontes de poluição são os óleos lubrificantes usados, por não serem biodegradáveis e possuírem uma alta toxicidade, se descartados no meio ambiente de forma incorreta, podem acarretar sérios danos ambientais. A fim de minimizar esses impactos, cientistas se empenham no desenvolvimento de novos lubrificantes a base de óleos vegetais (biolubrificantes), que possuam as mesmas características tribológicas de um óleo de base mineral ou sintético. Com foco neste cenário, o presente trabalho teve como objetivo principal a construção de uma máquina simuladora de desgaste, onde se realizou ensaios em óleos vegetais com diferentes tipos de aditivos em sua composição, a fim de compará-los quanto ao seu desempenho no simulador. Analisando os óleos testados, o óleo de canola com 5% do aditivo de origem vegetal foi o que obteve o melhor desempenho com relação à redução da taxa de desgaste, chegando até 82,14% de redução. Porém, com o uso dos diferentes aditivos, o óleo de origem mineral obteve as menores taxas de desgaste superando todos os óleos testados. Os resultados finais obtidos demonstraram o grande potencial da utilização do óleo vegetal como biolubrificantes, desde que encontrada a sua concentração ideal de aditivos.

Palavras Chave: Tribômetros. Desgaste. Atrito. Partículas de desgaste. Análise de lubrificantes. Biolubrificantes.

ABSTRACT

Global warming and the environment are the most troubling issues now-a-days. Thus, many studies are being developed in order to find ways to preserve them so that future generations can enjoy the same quality of life we have today. One of the most sources of pollution are the used lubricating oils, for not being biodegradable and have a high toxicity, if discarded in the environment incorrectly, can cause serious environmental damage. With these thoughts the choice for environmentally friendly products is a concern that is part of day-to-day companies seeking sustainable development, minimizing wherever possible the environmental aggressions. In order to minimize these effects, scientists are engaged in developing new lubricants based on vegetable oils (biolubricants) having the same tribological characteristics of a mineral oil or synthetic base. For future besides reducing dependence on petroleum for the manufacture of lubricants, we are preserving the environment. With focus on this scenario, the work in question has as main objective the construction of a machine to simulate wear, for testing and tribological analyzes in vegetables oils with different types of additives in your composition in order to compare them as to their performance in the simulator. Analyzing all the oils, canola oil with 5% additive of vegetable origin presented the best performance regard to reducing of wear rate reaching 82.14% reduction. However, with the use of different additives, mineral oil obtained lower rates of wear overcoming all oils tested. The final results showed the great potential of using vegetable oil as bio-lubricants, since it found its ideal concentration of additives.

Keywords: Tribometer. Wear. Friction. Wear particles. Analysis of lubricants. Biolubricants.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Representação esquemática de algumas configurações de tribômetros.	16
Figura 2: Transporte de um colosso egípcio a cerca de 1900 A.C.....	21
Figura 3: Tribômetros para determinação da força de atrito, desenvolvidos por Leonardo da Vinci.....	22
Figura 4: Processos de desgaste por modos de desgaste.....	25
Figura 5: Mecanismo de desgaste – Desgaste Abrasivo	26
Figura 6: Modos de desgaste abrasivo de 2 e 3 corpos.....	27
Figura 7: Mecanismo de desgaste – Desgaste Adesivo.....	28
Figura 8: Mecanismo de desgaste – Desgaste por fadiga	29
Figura 9: Mecanismo de desgaste – Desgaste corrosivo.....	30
Figura 10: Desgaste corrosivo x Tempo: (A) com formação da película na superfície, (B) sem formação da película na superfície.	31
Figura 11: Visão esquemática do processo de desgaste corrosivo, onde é assumido que o óxido é frágil e sai completamente.	31
Figura 12: Estrutura molecular e aplicações dos óleos básicos	33
Figura 13: Estrutura dos triglicéridos.....	36
Figura 14: Porção de glicerol de triglicéridos.....	36
Figura 15: Ácido oleico.....	37
Figura 16: Representação esquemática do fluido de separação de duas superfícies....	43
Figura 17: Determinação do índice de viscosidade.....	46
Figura 18: Equipamento para medir ponto de fluidez.....	47
Figura 19: Escala de comparação de cores	48
Figura 20: Classificação das partículas de desgaste	55
Figura 21: Partículas de desgaste vistas em microscópio.....	56
Figura 22: Gráficos da concentração de partículas de desgaste (WPC) pelo tempo	59
Figura 23: Gráfico do tipo "curva da asa".....	59
Figura 24: Analisador quantitativo de partículas (PQA).....	60
Figura 25: Exemplo de uma ferrograma e um equipamento de RPD.....	62
Figura 26: Espectrômetro de Raio - X.....	63
Figura 27: Viscosímetro Saybolt.....	64
Figura 28: Viscosímetro Cannon-Fenske	65
Figura 29: Equipamento Cleveland para ponto de fulgor	65
Figura 30: Titulador automático digital	67
Figura 31: Teste de dispersão.....	67
Figura 32: Microscópio OLYMPUS BX 41.....	68
Figura 33: Método Reichert.....	69
Figura 34: Concepção inicial da máquina de ensaio de atrito e desgaste.....	70

Figura 35: Concepção final da máquina	70
Figura 36: Vista explodida do dispositivo: (1) Suporte do corpo de prova, (2) Base, (3) Disco, (4) Rolete, (5) Carter, (6) Base do suporte principal, (7) Suporte principal, (8) Parte frontal, (9) Capa de proteção do motor.	71
Figura 37: SCP (suporte de corpo de prova).....	72
Figura 38: CPC (corpo de prova cilindro)	73
Figura 39: CPD (corpo de prova disco)	74
Figura 40: Carter	75
Figura 41: Fotos do Simulador de desgaste construído	76
Figura 42: Corpos de prova polidos (cilindros-aço ABNT 1020).....	77
Figura 43: Corpo de prova (disco-aço ABNT1045)	78
Figura 44: Tratamento térmico – têmpera	78
Figura 45: (A) Recipiente de propil galato, (B) Partículas microscópicas de propil galato variando de 200 a 700 μm	80
Figura 46: (A) Recipiente de ácido bórico, (B) Partículas microscópicas de ácido bórico variando de 50 a 600 μm	81
Figura 47: Molykote A-2	82
Figura 48: Aditivo em pó de origem vegetal com partículas de $\pm 250 \mu\text{m}$ e com partículas menores que 100 μm	83
Figura 49: Forno elétrico.	89
Figura 50: Lâmina de vidro presa à ventosa.	90
Figura 51: Óleo lubrificante colocado sobre a lâmina de vidro girando à 70 rpm.....	90
Figura 52: Imagens de alguns Rpd's.....	91
Figura 53: amostras para análise em PQA	93
Figura 54: Amostras preparadas.....	94
Figura 55 Oxford modelo X-Supreme.....	94
Figura 56 Gráfico do PQA do óleo de soja.....	109
Figura 57: Gráfico do PQA do óleo de canola	110
Figura 58: Gráfico do PQA do óleo de milho	111
Figura 59: Gráfico do PQA do óleo de girassol	112
Figura 60: Gráfico do PQA do óleo mineral.....	113
Figura 61: Espectrometria do Óleo de Soja	114
Figura 62: espectrometria do Óleo de Canola.....	115
Figura 63: Espectrometria do Óleo de Milho	116
Figura 64: Espectrometria do Óleo de Girassol.....	117
Figura 65: Espectrometria do Óleo Mineral.....	118
Figura 66: RPD da amostra do óleo de soja puro, (A) aumento de 100 vezes, (B) aumento de 500 vezes, (C) aumento de 1000 vezes.	119
Figura 67: RPD da amostra do óleo de canola com 2,5% de molykote, (A) aumento de 100 vezes, (B) aumento de 500 vezes, (C) aumento de 1000 vezes.	119

Figura 68: RPD da amostra do óleo de girassol com 2,5% de aditivo de origem vegetal, (A) aumento de 100 vezes, (B) aumento de 500 vezes, (C) aumento de 1000 vezes.	120
Figura 69: RPD da amostra do óleo de milho com 2,5% de ácido bórico, (A) aumento de 100 vezes, (B) aumento de 500 vezes, (C) aumento de 1000 vezes.	120
Figura 70: RPD da amostra de óleo de mineral com 5% de propil galato, (A) aumento de 100 vezes, (B) aumento de 500 vezes, (C) aumento de 1000 vezes.	121

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Algumas aplicações dos óleos vegetais	41
Tabela 2: Tabela de soja	84
Tabela 3: Tabela de canola	85
Tabela 4: Tabela de milho	86
Tabela 5: Tabela de girassol	87
Tabela 6: Tabela de mineral	88
Tabela 7: Ensaio com óleo de soja	95
Tabela 8: Ensaio com óleo de canola	96
Tabela 9: Ensaio com óleo de milho	97
Tabela 10: Ensaio com óleo de girassol.....	98
Tabela 11: Ensaio com óleo mineral	99
Tabela 12: Imagens dos cilindros desgastados com o óleo de soja.....	100
Tabela 13: Imagens dos cilindros desgastados com o óleo de canola.....	101
Tabela 14: Imagens dos cilindros desgastados com o óleo de milho.....	103
Tabela 15: Imagens dos cilindros desgastados com o óleo de girassol.....	105
Tabela 16: Imagens dos cilindros desgastados com o óleo de mineral	107
Tabela 17: Índice PQ óleo de soja	109
Tabela 18: Índice PQ óleo de canola	110
Tabela 19: Índice PQ óleo de milho	111
Tabela 20: Índice PQ óleo de girassol.....	112
Tabela 21: Índice PQ óleo mineral	113

LISTA DE SIMBOLOS E ABREVIATURAS

Ra	rugosidade média
h	espessura da camada do fluido
F	força
A	área
u	velocidade
η	viscosidade Dinâmica [Pas]
μ	cisalhamento atuante no Fluido [Pa]
u/h	taxa de cisalhamento [s^{-1}]
ν	viscosidade Cinemática [m^2/s]
ρ	densidade do fluido [Kg/m^3]
cP	viscosidade
cSt	viscosidade
IV	índice de viscosidade
TBN	número total de base
TAN	número total de ácido
WPC	concentração de partículas de desgaste
PLP	porcentagem de partículas grandes
PQ	quantidade magnética de partículas no óleo
PQA	analisador quantitativo de partículas
RPD	depositador rotativo de partículas

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	Justificativa:.....	17
1.2	Objetivo geral:	18
1.3	Objetivos específicos:	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1	Tribologia – Breve histórico:.....	20
2.2	Desgaste:.....	23
2.2.1	<i>Mecanismos de desgaste:</i>	25
2.2.2	<i>Desgaste Abrasivo:</i>	26
2.2.3	<i>Desgaste Adesivo:</i>	28
2.2.4	<i>Desgaste por Fadiga:</i>	28
2.2.5	<i>Desgaste Corrosivo e Oxidativo:</i>	29
2.2.6	<i>Lubrificantes:</i>	32
2.3	Biolubrificantes.....	35
2.4	Propriedades dos lubrificantes:	42
2.4.1	<i>Viscosidade:</i>	42
2.4.2	<i>Viscosidade dinâmica:</i>	43
2.4.3	<i>Viscosidade cinemática:</i>	44
2.4.4	<i>Índice de viscosidade:</i>	45
2.4.5	<i>Ponto de fulgor:</i>	46
2.4.6	<i>Ponto de fluidez:</i>	47
2.4.7	<i>Cor:</i>	47
2.4.8	<i>Estabilidade térmica:</i>	49
2.4.9	<i>TAN/TBN:</i>	49
2.5	Funções dos Lubrificantes:	50
2.6	Aditivos:	51
2.7	Análise de partículas de desgaste em óleos lubrificantes:.....	54
2.8	Algumas técnicas de análise de óleos:	57
2.8.1	<i>Ferrografia</i>	57

2.8.2	<i>Ferrografia quantitativa:</i>	58
2.8.3	<i>Ferrografia analítica:</i>	60
2.8.4	<i>Espectrometria de raio X:</i>	62
2.8.5	<i>Viscosímetro:</i>	63
2.8.6	<i>Equipamento Cleveland para ponto de fulgor:</i>	65
2.8.7	<i>Titulador:</i>	66
2.8.8	<i>Teste de dispersão:</i>	67
2.8.9	<i>Ferrosκόpio:</i>	68
3	MATERIAIS E MÉTODOS	69
3.1	Projeto da Máquina Simuladora de Desgaste:	69
3.2	Funcionamento da Máquina:	75
3.3	Fabricação dos corpos de prova:	77
3.4	Procedimentos para realização do ensaio:	79
3.5	Aditivos e óleos utilizados nos ensaios:	80
3.6	Análise dos Lubrificantes	89
4	RESULTADOS	95
4.1	Discussão dos Ensaios de Desgaste	121
4.2	Discussão dos Ensaios PQA	124
4.3	Discussão dos Ensaios de Espectrometria de Raio X	125
4.4	Discussão dos Ensaios RPD	125
5	CONCLUSÕES	126
6	PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	128
	REFERÊNCIAS	129

1 INTRODUÇÃO

O desgaste excessivo em dispositivos mecânicos é um dos fatores mais preocupantes para a indústria, pois a quebra desses dispositivos pode causar a diminuição do processo fabril e conseqüentemente elevar os custos de manutenção.

Com isso adquirir conhecimentos apenas em processos de fabricação não é suficiente, visto que há também a necessidade de se estudar e entender os processos de desgaste ocorridos nos sistemas e meios de prevenção dos mesmos.

O estudo do atrito e desgaste é essencial para engenharia, no qual é possível obter informações que auxiliam na elaboração de projetos, no desenvolvimento de novos materiais e controle de qualidade dos elementos em operação.

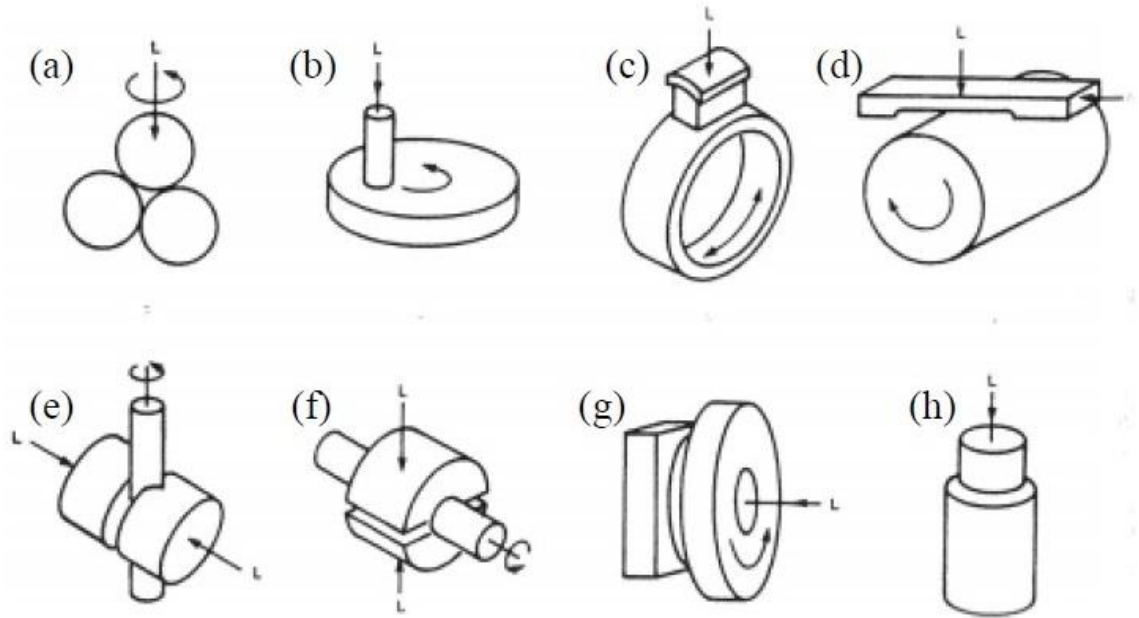
Uma tecnologia muito utilizada no estudo desses fenômenos são os tribômetros, que tem como principal função proporcionar simulações de atrito e desgaste sob condições controladas. Ensaios de desgastes através de tribômetros são de elevada importância, pois é possível simular a degradação que ocorreria em um equipamento durante um longo período de utilização, em um tempo relativamente menor (GONÇALVES; PADOVESE, 2012).

Um tribômetro cuidadosamente selecionado pode simular várias características de um problema de desgaste ou atrito, sem as dificuldades associadas à experimentação em equipamento real. Em contrapartida, um tribômetro mal projetado ou selecionado pode fornecer resultados inteiramente falsos.

Bayer (2004) classifica os testes laboratoriais de atrito e desgaste em dois grupos, o primeiro como sendo testes fenomenológicos onde o foco do ensaio são situações gerais de desgaste, como por exemplo desgaste por deslizamento, abrasão ou erosão. O segundo grupo são os testes operacionais, que focam em aplicações específicas do dispositivo como exemplo, testes de desgaste para revestimentos de freios, mancais ou engrenagens.

Existe uma grande gama de métodos para realização de ensaios de atrito e desgaste. Algumas das metodologias mais utilizadas para simular estes fenômenos estão simbolizadas a seguir na figura 1.

Figura 1: Representação esquemática de algumas configurações de tribômetros.



Fonte: (FARIAS, 2005)

A figura 1(a) representa o ensaio “Four-Ball”, onde uma esfera é posta a girar contra outras três esferas estacionárias, são utilizados para ensaios de extrema pressão de lubrificantes. Já a figura 1(b) mostra o dispositivo pino-sobre-disco, que consiste em aplicar uma carga sobre um pino em contato com um disco que gira.

Outro equipamento padronizado é o “Timken Test” mostrado na figura 1(c), na qual um disco é atritado contra um bloco. Nele, há possibilidade de testar vários materiais, lubrificantes, cargas e velocidades de rotação.

Na figura 1(d) é apresentado um ensaio onde um cilindro é posto a atritar contra uma lâmina, que é pressionada sobre o mesmo. A figura 1(e) é chamada de ensaio “Falex”, onde dois blocos com formato em “V” são pressionados contra um pino girando, este teste consiste em determinar o limite de carregamento antes que o pino quebre por cisalhamento.

Outro teste parecido com o “Falex” é mostrado na figura 1(f), que consiste em duas metades de cilindro em contato com um pino central.

Na figura 1(g) está representado um teste de desgaste onde uma das faces de um disco girante é posta a atritar contra uma superfície plana.

Por fim, a figura 1(h) mostra dois cilindros concêntricos, onde um é forçado a se deslizar por dentro do outro.

Todo tribômetro deve conter um material atritando e desgastando, que é o núcleo do equipamento e também alguns dispositivos auxiliares que forneçam movimento, carga, lubrificante e até atmosferas especiais.

Simuladores de atrito mais avançados possuem instrumentos para medição do coeficiente de atrito, taxas de desgaste e temperatura.

1.1 Justificativa:

O aquecimento global e o meio ambiente são uns dos mais preocupantes temas da atualidade, com isso, inúmeras pesquisas estão em desenvolvimento a fim de encontrar meios para preservação dos mesmos de modo que as gerações futuras possam desfrutar da mesma qualidade de vida que temos hoje.

Tais assuntos foram abordados na Conferência das Nações Unidas sobre Desenvolvimento Sustentável, a Rio+20, realizada em junho de 2012, na cidade do Rio de Janeiro. A Conferência do Rio consolidou o conceito de desenvolvimento sustentável, proposto pelo Relatório Nosso Futuro Comum, de 1987, que tem como diretriz a ideia de um desenvolvimento que atenda às necessidades das gerações presentes sem comprometer a habilidade das gerações futuras de suprirem suas próprias necessidades (RIO+20).

Com esses pensamentos a escolha por produtos ambientalmente corretos é uma preocupação que faz parte do dia-a-dia de empresas que procuram o desenvolvimento sustentável, minimizando sempre que possível às agressões ambientais.

Uma das grandes fontes de poluição são os óleos lubrificantes usados, por não serem biodegradáveis e possuírem uma alta toxicidade, se descartados no meio ambiente de forma incorreta, podem acarretar sérios danos ambientais.

A fim de minimizar esses impactos, cientistas se empenham no desenvolvimento de novos lubrificantes de base vegetais (biolubrificantes), que possuam as mesmas características tribológicas de um óleo de base mineral ou sintético. Para que futuramente além de diminuir a dependência do petróleo para a fabricação de lubrificantes, estaremos de certa forma preservando o meio ambiente.

Neste sentido, foi construído um tribômetro para auxiliar no desenvolvimento de formulações de biolubrificantes. Através de comparações de desgastes dos componentes do tribômetro e das análises dos lubrificantes utilizados nos experimentos, poder-se-á ter uma orientação do prosseguimento das pesquisas com determinados óleos vegetais e aditivos, como possível substituto dos lubrificantes minerais.

1.2 Objetivo geral:

Com foco neste cenário o presente trabalho tem como objetivo principal a construção de um dispositivo simulador de desgaste, para realização dos ensaios e a verificação da capacidade de lubrificação de alguns óleos vegetais.

Serão utilizados nesse equipamento diferentes tipos de óleos vegetais com diferentes concentrações de aditivos em sua formulação, a fim de obter óleos vegetais com propriedades lubrificantes similares a alguns óleos minerais ou sintéticos atualmente comercializados, para posteriormente testá-los em algum dispositivo mecânico.

1.3 Objetivos específicos:

Os objetivos específicos desse trabalho são:

- Realizar ensaios de desgaste no simulador desenvolvido, utilizando os óleos vegetais aditivados.
- Analisar os desgastes ocorridos nos corpos de provas através da perda de massa e da microscopia.
- Quantificar o desgaste através de algumas técnicas de análise de partículas em óleo.
- Comparar os óleos testados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Tribologia – Breve histórico:

Tribologia deriva-se das palavras gregas “TRIBOS” que significa atrito, e “LOGOS” que significa estudo, conhecida como o estudo do atrito. É descrita por inúmeros autores como “A ciência e a tecnologia da interação entre superfícies com movimento relativo e dos assuntos e práticas relacionadas” (HALLING, 1975; WILLIAMS, 2005), baseada na mecânica, física, química e ciência dos materiais, com seu foco direcionado para o estudo do atrito, desgaste e lubrificação.

Surgiu pela primeira vez na Inglaterra, em 1966, em um relatório presidido por Peter Jost, o qual descrevia um estudo sobre os impactos econômicos do uso dos conhecimentos da tribologia, cujas perdas totais estimadas seriam de 515 milhões de libras, correspondendo a 0,5% do PNB (DOWSON, 1979 citado por SINATORA, 2005).

Estudos subsequentes em outros países, incluindo os Estados Unidos, Alemanha, Austrália e China chegaram a conclusões semelhantes sobre o impacto potencial da tribologia em suas economias nacionais (WILLIAMS, 2005).

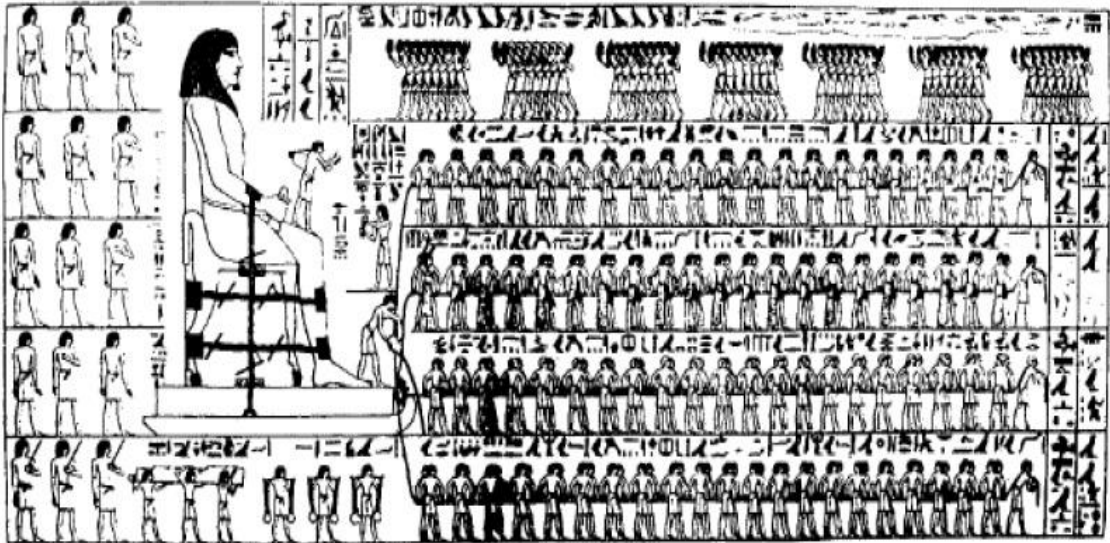
Para Bhushan (1999) a finalidade da pesquisa em tribologia é a minimização e eliminação das perdas resultantes de atrito e desgaste em todos os níveis de tecnologias, para uma maior eficiência, melhor desempenho, menos avarias e significativas economias. Segundo Stachowiak (2001), o custo que é gerado por deficiências tribológicas em qualquer economia nacional, é causado por uma grande quantidade de energia e materiais que são perdidos nos mecanismos das máquinas em operação. Ao fazer uma análise levando-se em conta uma única máquina, as perdas são consideradas pequenas, mas quando a perda da mesma é repetida em um milhão de máquinas semelhantes, os custos se tornam gigantescos.

É possível dizer que a tribologia tem sido registrada desde o início de sua história, devido a muitos exemplos documentados. No período Paleolítico gerava-se fogo pelo atrito entre madeiras ou lascas de pedras. No período Mesolítico, surgem

dispositivos para transportes de cargas pesadas, descobertas de novos materiais e técnicas para confecção de ferramentas de trabalho.

A aplicação de princípios tribológicos na redução de atrito, pode ser constatada no antigo Egito. Na figura 2 temos um exemplo de um transporte onde 172 escravos são empregados para puxar uma grande estátua. O desenho mostra um homem sobre o trenó aspergindo um líquido no caminho de movimento da estátua e homens carregando pranchas planas e jarros contendo um possível lubrificante.

Figura 2: Transporte de um colosso egípcio a cerca de 1900 A.C



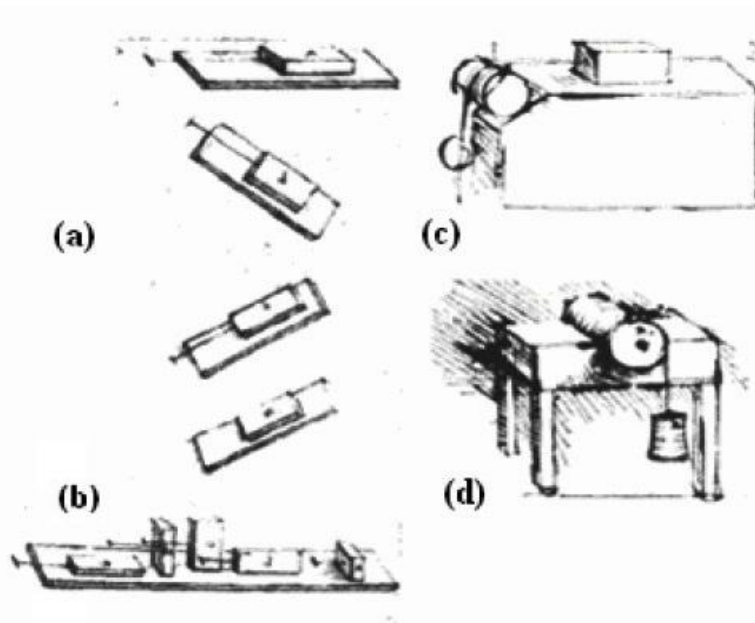
Fonte: (HALLING, 1975)

No período da Renascência, Leonardo da Vinci (1452-1519), considerado um dos maiores gênios de todos os tempos, deu importantes contribuições para tribologia.

Segundo Sinatora (2005), dentro de suas descobertas, as mais significativas para tribologia são suas contribuições sobre rolamentos, determinação da força de atrito entre objetos sobre superfícies horizontais e inclinadas, efeito da área aparente na força de atrito, o emprego da polia para medida de força de atrito, e o torque devido ao atrito num cilindro (meio mancal), considerados como os primeiros tribômetros documentados na história da civilização.

A figura 3 apresenta os dispositivos utilizados por Leonardo da Vinci para determinação da força de atrito, onde: (a) em superfícies horizontais e inclinadas; (b) considerando o efeito da área aparente; (c) utilizando uma polia; e (d) considerando o torque num cilindro.

Figura 3: Tribômetros para determinação da força de atrito, desenvolvidos por Leonardo da Vinci



Fonte: (SINATORA, 2005)

Dispositivos estes que posteriormente seriam melhorados por Amontou e Coulomb. Foi então em 1699, que Amontons publicou suas redescobertas sobre as leis do atrito propostas por Leonardo da Vinci, onde a força de atrito era diretamente proporcional à carga normal e era independente da área de contato aparente.

Estas observações foram verificadas por Coulomb, em 1781, que fez uma clara distinção entre o atrito estático e cinético (BHUSHAN, 1999).

O livro intitulado *History of Tribology* escrito por Duncan Dowson é frequentemente citado por pesquisadores, considerado como obra de referência para muitos trabalhos. Este livro possui uma revisão sobre a história da tribologia, descrevendo as contribuições de vários cientistas para essa ciência, como Charles

Augustin Coulomb (1736 - 1806), Leonhard Euler (1707 - 1783), Osborne Reynolds (1842 - 1919), Heirich Rudolph Hertz (1869 - 1851) e outros.

2.2 Desgaste:

A compreensão do desgaste muitas vezes envolve um conhecimento detalhado sobre mecânica, física, química e ciência dos materiais, enquanto que sua quantificação, mesmo que dentro de uma ordem de grandeza, permanece em muitos casos, um objetivo distante. Apesar de ser possível a minimização do desgaste, muitas vezes por meio de lubrificação, o tamanho dessa redução quase nunca pode ser prevista com precisão (HUTCHINGS, 2005).

Existem várias formas para descrever o desgaste, Halling (1975) diz que esse fenômeno ocorre como consequência natural quando duas superfícies com um movimento relativo interagem uma na outra.

Para WILLIAMS (2005) desgaste é um dano progressivo que envolve a perda de materiais, que ocorre na superfície dos componentes como resultado do seu movimento em relação às partes adjacentes de trabalho.

Bayer (2004) completa que o desgaste não se limita apenas à perda de materiais de uma superfície, pode ser definido também pelo movimento do material sem perda de massa, ou seja, alterações na geometria ou dimensão como resultado de uma deformação plástica. Há também um terceiro modo, o qual o dano não resulta em perda de massa ou em alterações dimensionais, um exemplo disto pode ser o desenvolvimento de fissuras numa superfície.

Como descrito, o desgaste é a principal causa da perda de materiais e propriedades mecânicas e qualquer redução que possa ser feita com relação a esse fenômeno pode resultar em consideráveis economias (STACHOWIAK, 2001).

O desgaste torna-se preocupante a medida que sua dimensão fica aparente e passa a interferir no rendimento do dispositivo. Conforme Bayer (1994), citado por Maru(2003), há pelo menos três formas de classificar o desgaste:

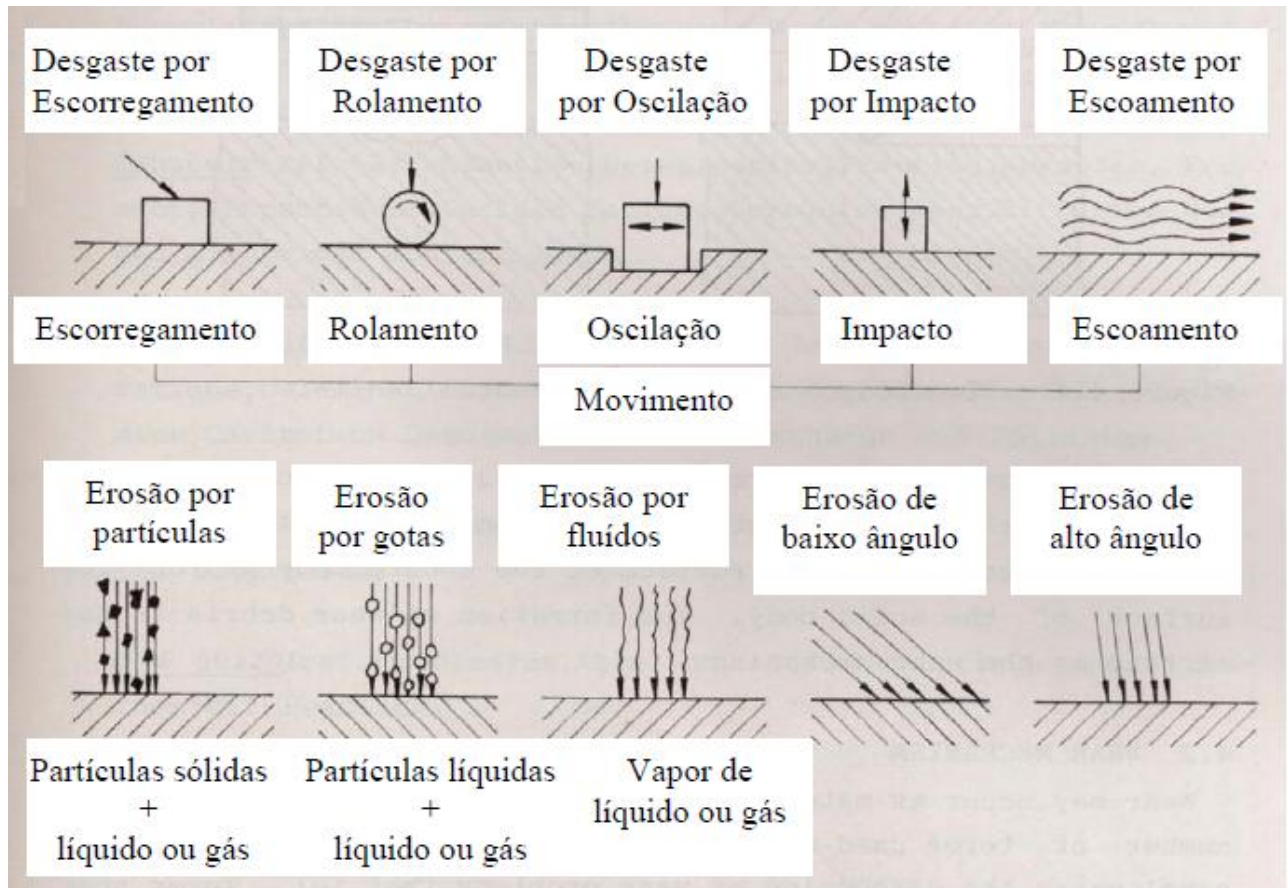
- Aparência de trilha (por exemplo: riscado, pitting, polido). Esta classificação permite a comparação de uma situação de desgaste com outras, permitindo extrapolar experiências adquiridas em uma situação de desgaste a outras novas.
- Mecanismos físicos de remoção de material ou causadores de dano (por exemplo: adesão, abrasão, oxidação, delaminação). Esta classificação fornece um guia para o uso de modelos para predizer ou projetar uma vida de desgaste ou identificar a significância da dependência dos parâmetros que podem ser controlados, como carga, geometria, velocidade, ambiente.
- Condições que envolvem a situação de desgaste (desgaste lubrificado, a seco, desgaste metal-metal, desgaste por deslizamento, por rolamento, em alta temperatura).

Essa classificação descreve uma situação de desgaste em termos de condições macroscópicas, de modo que um conjunto de relações, regras ou equações específicas possam ser identificadas e usadas no sistema.

De maneira geral, todo sistema perde a durabilidade e confiabilidade devido ao desgaste, através disso, conhecer os diversos tipos de desgaste é de grande importância para que se possa identificar suas origens e procurar a melhor forma de evitá-los. A complexidade do desgaste pode ser melhor entendida conhecendo as variáveis envolvidas no processo, como: Dureza, tenacidade, ductilidade, módulo de elasticidade, tensão de escoamento, propriedades relativas à fadiga, estrutura e composição das superfícies em contato, geometria, pressão de contato, temperatura, estado de tensões, distribuição de tensões, coeficiente de atrito, distância de escorregamento, atmosfera ambiente na interface de desgaste, velocidade relativa, acabamento superficial, lubrificantes e contaminantes (STOETERAU, 2004).

O processo de desgaste pode ser classificado de acordo com seus modos de desgaste, ou seja, através das variações das ações que ocorrem na interface do corpo, como representa a figura 4 a seguir:

Figura 4: Processos de desgaste por modos de desgaste



Fonte: Peterson (1980) citado por Suski, (2004)

2.2.1 Mecanismos de desgaste:

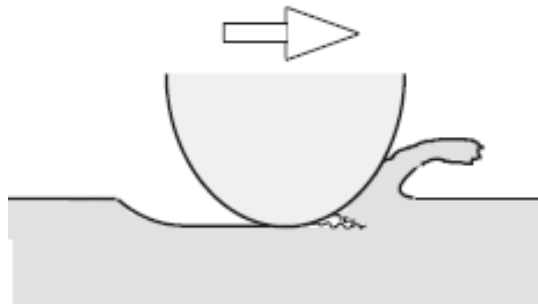
Existem diversas formas para descrever o desgaste, Ludema (1996), por exemplo, cita mais de 30 termos referente a esse fenômeno. Porém, alguns autores como Rabinowicz (1995) descrevem o desgaste em quatro formas principais, desgaste abrasivo, adesivo, corrosivo e por fadiga, além de alguns processos marginais que

muitas vezes são classificados como formas de desgaste e que em muitas ocasiões, um dos modos de desgaste afeta os outros.

2.2.2 Desgaste Abrasivo:

Desgaste abrasivo ocorre quando há uma superfície sólida, dura e rugosa sendo carregada sobre uma superfície mais mole, ou uma superfície mole contendo partículas duras, deslizando sobre uma superfície mais mole, ocasionando riscamento e remoção do material. A Figura 5 apresenta o mecanismo de desgaste por abrasão.

Figura 5: Mecanismo de desgaste – Desgaste Abrasivo



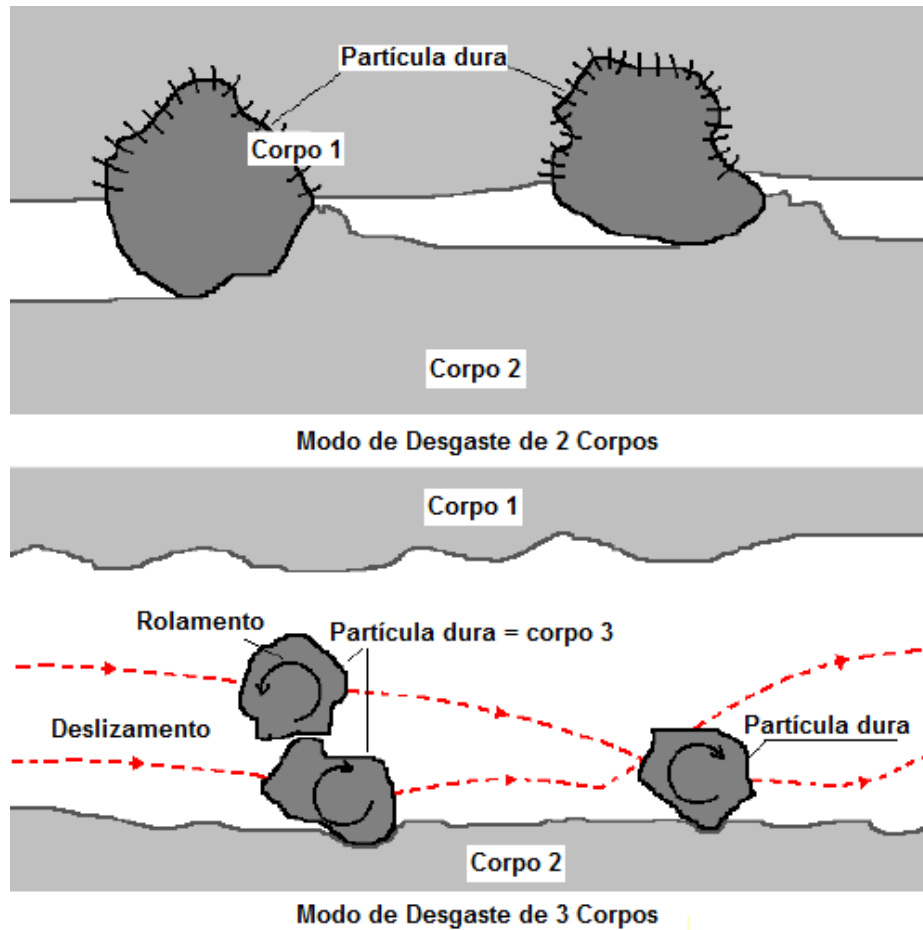
Fonte: (KATO; ADACHI; 2001)

Uma das maiores dificuldades na prevenção e controle do desgaste abrasivo é que o termo "desgaste por abrasão" não descreve com precisão os mecanismos de desgaste e suas causas. Existem, de fato, diferentes mecanismos de desgaste com características diferentes que atuam em conjunto (STACHOWIAK, 2001). A maneira que as partículas passam desgastando a superfície determinam a natureza do desgaste abrasivo.

Stachowiak (2001) cita duas formas de desgaste abrasivo, desgaste de 2 corpos quando uma superfície dura e rugosa, ou uma superfície macia contendo partículas duras, desliza sobre uma superfície de menor dureza, produzindo nela diversas ranhuras, e de 3 corpos quando as partículas duras são livres para rolar e deslizar entre

as 2 superfícies. A figura 6 a seguir mostra a representação desses dois tipos de desgaste.

Figura 6: Modos de desgaste abrasivo de 2 e 3 corpos



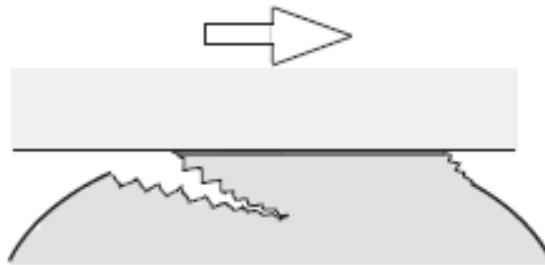
Fonte: (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2005 citado por LAGO 2007)

Segundo Stoeterau (2004), desgaste abrasivo de dois corpos não ocorre quando a superfície dura deslizante é lisa, da mesma forma que o desgaste abrasivo de três corpos não ocorrerá se as partículas no sistema forem pequenas ou mais moles que os materiais deslizantes.

2.2.3 *Desgaste Adesivo:*

O desgaste adesivo ocorre quando a interface de contato entre duas superfícies em contato plástico contém uma força de ligação adesiva suficiente para resistir ao deslizamento. Assim, uma grande deformação plástica, causada pelo deslocamento relativo é introduzida na região de contato. Com o resultado dessa deformação, inicia-se uma trinca que posteriormente se propaga. Então, estes fragmentos podem-se soltar da superfície e se transferir para a outra ou se transformar em partículas de desgaste (KATO; ADACHI, 2001, RABINOWICZ; 1995) como ilustra a figura 7 a seguir.

Figura 7: Mecanismo de desgaste – Desgaste Adesivo



Fonte: (KATO; ADACHI, 2001)

Para Stachowiak (2001), o desgaste adesivo é uma forma muito grave de desgaste, caracterizado por altas taxas de desgaste e um grande coeficiente de atrito instável. Contatos deslizantes podem ser rapidamente destruído pelo desgaste adesivo e, em alguns casos, o movimento deslizante pode ser impedido pela existência de grandes coeficientes de atrito.

2.2.4 *Desgaste por Fadiga:*

Em casos de desgaste onde um certo número de contatos repetidos são essenciais para a geração de partículas de desgaste, tais ciclos de contato podem ocasionar desgaste por fadiga, termo comumente usado na literatura para danos em

superfícies causados por contatos cíclicos. A figura 8 seguir ilustra esse mecanismo de desgaste.

Figura 8: Mecanismo de desgaste – Desgaste por fadiga



Fonte: (KATO; ADACHI, 2001)

Segundo Stoeterau (2004), com o movimento cíclico de rolamento, a zona de contato desloca-se, de modo que a tensão de cisalhamento varia de zero a um valor máximo e retorna a zero, produzindo tensões cíclicas que podem levar a uma falha por fadiga do material. Os ciclos repetidos de carga e descarga para o qual os materiais são expostos podem induzir a formação de fissuras superficiais ou subsuperficiais, o que eventualmente conduzirá ao colapso da superfície, com a formação de fragmentos, deixando grandes cavidades na superfície (RABINOWICZ, 1995).

2.2.5 Desgaste Corrosivo e Oxidativo:

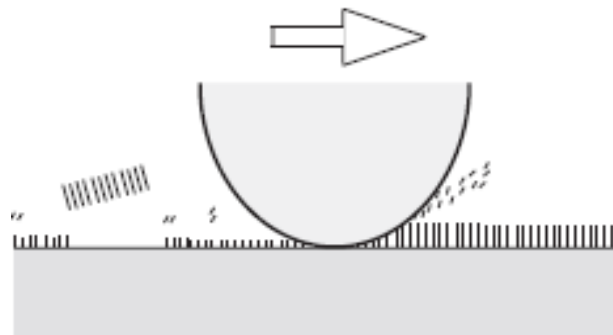
O desgaste corrosivo ocorre quando o material deslizante se localiza em meios corrosivos, sendo líquidos ou gasosos. Na ausência de deslizamento, os produtos da corrosão formam uma película sobre a superfície, que tende a retardar ou mesmo impedir a corrosão (RABINOWICZ, 1995).

Desgaste corrosivo e oxidativo, ocorrem numa ampla variedade de situações, tanto lubrificadas quanto não lubrificadas. Desgaste oxidativo é o modo mais representativo do desgaste corrosivo de metais.

Desgaste corrosivo é um termo geral relativo a qualquer forma de desgaste dependente de um processo químico ou corrosivos, enquanto que o desgaste oxidativo refere-se ao desgaste causado pelo oxigênio atmosférico (STACHOWIAK, 2001).

O processo de desgaste corrosivo ocorre através da remoção contínua por atrito da película formada pela reação química na superfície de contato como mostrado na figura 9 abaixo.

Figura 9: Mecanismo de desgaste – Desgaste corrosivo

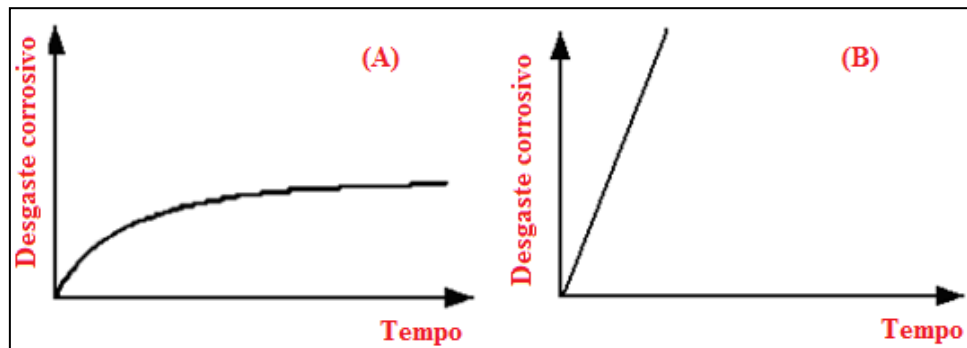


Fonte: (KATO; ADACHI, 2001)

Rabinowicz (1995) descreve o processo de desgaste em dois estágios, o primeiro deles é o ataque corrosivo da superfície. Esta fase é idêntica ao que acontece em uma corrosão comum, quando a superfície é exposta a um ambiente reagente, ocorre uma reação inicial rápida que se torna lenta devido à formação de uma película na superfície protegendo-a (figura 10 (A)).

De outra forma, essa reação química pode ser contínua, isso ocorre porque nenhuma película protetora é formada (figura 10 (B)).

Figura 10: Desgaste corrosivo x Tempo: (A) com formação da película na superfície, (B) sem formação da película na superfície.



Fonte: Adaptada de (RABINOWICZ, 1995)

O segundo passo no processo de desgaste corrosivo consiste da remoção da película do produto da reação, como resultado do escorregamento entre as superfícies do sistema. Quando isto ocorre, a superfície está novamente exposta e o ataque corrosivo continua. Na maioria dos casos, os produtos gerados na corrosão são mais duros e mais frágeis do que as superfícies na qual eles se formam. Há uma tendência para a camada ser razoavelmente resistente ao desgaste contanto que esta seja fina.

Para que haja o desgaste assim que determinada espessura de óxido é alcançada e dependendo das condições de deslizamento, esta camada pode descamar completamente. Assim tem-se a superfície desprotegida e o processo se repete conforme mostrado na figura 11 a seguir.

Figura 11: Visão esquemática do processo de desgaste corrosivo, onde é assumido que o óxido é frágil e sai completamente.



Fonte: Adaptada de (RABINOWICZ, 1995)

2.2.6 Lubrificantes:

O contato superficial é responsável por controlar o desempenho dos dispositivos mecânicos, e grande parte desses dispositivos operam sobre deslizamento lubrificado.

A presença de lubrificante na superfície de contato, mesmo que em camadas com espessura de ordem molecular pode alterar as respostas tribológicas do sistema (PERSSON, 1998 citado por MARU, 2003).

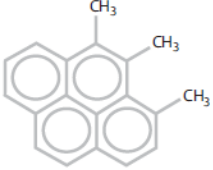
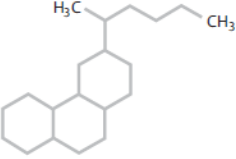
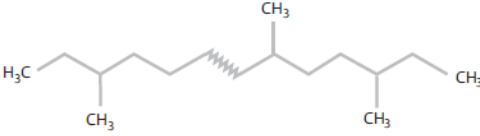
Os grandes avanços na área desenvolvimento de lubrificantes ocorreu somente após a fundação da indústria petrolífera moderna, em 1859. Oleofinas polimerizadas foram os primeiros óleos sintéticos a serem produzidos, ocorreu em 1929, em um esforço para melhorar as propriedades dos óleos de petróleo. O interesse em ésteres lubrificantes datam de 1937, na Alemanha, e sua produção e utilização expandiu-se rapidamente durante e após a Segunda Guerra Mundial, para atender às necessidades militares e para uso em motores de aviões a jato recém-desenvolvidos. Uma ampla gama de outros lubrificantes sintéticos entraram em produção durante o mesmo período, com propriedades específicas. Lubrificantes de petróleo ainda representam mais de 95% do total do volume de produção de óleo e graxa (KHONSARI; BOSSER, 2008).

Os óleos lubrificantes podem ser classificados de acordo com sua forma física, podendo ser líquidos, pastosos, sólidos e gasosos. De maneira geral os óleos podem ser subdivididos em: Óleos minerais puros, graxos, compostos, aditivados e sintéticos.

Óleos minerais puros: Os óleos minerais são produzidos por refinação do petróleo bruto e são os ingredientes iniciais para mais de 95% de todos os lubrificantes em produção. As propriedades e características dependem da origem e do tipo do petróleo, estes óleos consistem essencialmente de hidrocarbonetos que variam em peso molecular de cerca de 250 (com um esqueleto de cerca de 18 átomos de carbono) para os lubrificantes com baixa viscosidade e de 1000 para lubrificantes com alta viscosidade (KHONSARI; BOSSER, 2008). Os óleos minerais são pertencentes a três

classes, denominadas parafínicas, nafténicas e aromáticas que são mostradas no quadro da figura 12 a seguir:

Figura 12: Estrutura molecular e aplicações dos óleos básicos

Tipo	Ligação	Algumas Aplicações
Óleos Básicos Aromáticos		Extensores e emolientes na indústria de borracha.
Óleos Básicos Nafténicos		Óleos para transformadores, compressores de refrigeração e compressores de ar.
Óleos Básicos Parafínicos		Óleos de motor, óleos hidráulicos e óleos de engrenagens.

Fonte: (TEXACO, 2005).

Segundo Stachowiak (2001) os óleos minerais são os lubrificantes mais utilizados em toda a indústria, em aplicações onde os requisitos de temperatura são moderados. As aplicações típicas de óleos minerais são em engrenagens, rolamentos, motores, turbinas, etc.

Óleos graxos: Podem ser de origem animal ou vegetal. Foram os primeiros lubrificantes a serem utilizados e satisfaziam as necessidades da época em que a tração animal predominava. Sua utilização em máquinas modernas é evitada, devido à sua instabilidade química em altas temperaturas, oxidando-se facilmente, tornando-se rançosos e formando ácidos (MOURA; CARRETEIRO, 1987). Para Stachowiak (2001), esses óleos são adequados para aplicações onde o risco de contaminação deve ser reduzido, por exemplo, na indústria alimentícia ou farmacêutica, geralmente aplicados para lubrificar fornos, fornos de padaria, etc.

Óleos compostos: São constituídos de misturas de óleos minerais e graxos. A porcentagem de óleo graxo é pequena, variando de acordo com a finalidade do óleo. Algumas aplicações especiais requerem o uso de óleos compostos, que conferem ao produto obtido maior oleosidade e maior facilidade de emulsão na presença de vapor.

Óleos aditivados: São óleos minerais puros, que foram adicionadas substâncias chamadas de aditivos, com o intuito de melhorar ou acrescentar determinadas propriedades ao óleo lubrificante (CUNHA, 2005).

Óleos sintéticos: São especificamente desenvolvidos para obterem propriedades superiores aos óleos minerais e são criados em laboratório. Interesses passados em lubrificantes sintéticos eram devido à sua capacidade para resistir a queima a um maior grau do que os óleos minerais, e por oferecerem vantagens na proteção de equipamentos que operam em condições extremas. Estas condições incluem temperaturas muito baixas ou muito elevadas (PIRRO; WESSOL, 2001).

Outros líquidos: Outros líquidos são às vezes empregados como lubrificantes, quando não é possível a utilização dos tipos mencionados acima. A água, por exemplo, é algumas vezes empregada, porém possui propriedades lubrificantes reduzidas, além de favorecer a ação corrosiva sobre os metais.

Lubrificantes pastosos: Comumente chamados de graxas, são empregados onde os lubrificantes líquidos não executam suas funções satisfatoriamente.

São frequentemente utilizadas onde há a necessidade do lubrificante se manter em sua posição original no mecanismo, especialmente onde as oportunidades de relubrificação frequente pode ser limitada ou economicamente inviável. Este requisito pode ser devido à configuração física do dispositivo, o tipo de movimento, tipo de vedação, ou a necessidade de executar a lubrificação total ou parcial de vedação, para prevenir a perda de lubrificante ou a entrada de contaminantes. Devido à sua natureza essencialmente sólida, graxas não executam as funções de arrefecimento e limpeza associados a utilização de fluido lubrificante. Exceto essas funções, as graxas são esperados para realizar todas as outras funções de lubrificantes fluidos (PIRRO; WESSOL, 2001).

Lubrificantes sólidos: São usados, geralmente, como aditivos de lubrificantes líquidos ou pastosos. Algumas vezes, são aplicados em suspensão, em líquidos que se evaporam após a sua aplicação. O grafite, o molibdênio, o talco, a mica, são os mais empregados. Estes lubrificantes apresentam grande resistência a elevadas pressões e temperaturas (CPM, 1997).

Lubrificantes gasosos: São empregados em casos especiais, quando não é possível a aplicação dos tipos convencionais. São normalmente usados o ar, o nitrogênio e os gases halogenados. Sua aplicação é restrita, devido à vedação exigida e às elevadas pressões necessárias para mantê-los entre as superfícies (CPM, 1997).

2.3 Biolubrificantes

Com o passar dos anos milhões de toneladas de lubrificantes são descartados de forma incorreta em solos ou cursos de água. Estima-se que cerca de 600.000 toneladas de petróleo por ano, simplesmente desaparecem descontroladamente na Europa em forma de vazamentos e descartes irregulares (WILSON, 1998).

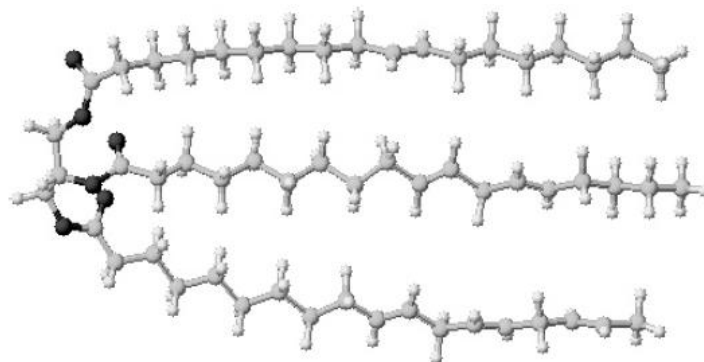
Para minimizar os danos ocasionados pela contaminação de produtos à base de petróleo sobre o meio ambiente, notou-se uma procura crescente por produtos ambientalmente corretos (biolubrificantes), pois além de serem biodegradáveis e não tóxicos são derivados de matérias-primas renováveis.

Alguns fatos registrados demonstram que os primeiros óleos lubrificantes utilizados pelo homem eram de origem animal e vegetal, que posteriormente foram aos poucos sendo substituídos por lubrificantes de base mineral, e estes, por sua vez, estão sendo substituídos por óleos sintéticos, devido à necessidade de óleos de alto desempenho.

Os biolubrificantes são obtidos a partir de bases vegetais e são considerados biodegradáveis. São frequentemente utilizados onde a sua aplicação envolve riscos de vazamentos que possam comprometer o meio ambiente (SILVA, 2012).

A maioria dos óleos vegetais são triglicéridos, que são compostas de uma molécula de glicerol esterificado com vários ácidos graxos, sua estrutura generalizada é mostrada na Figura 13 a seguir:

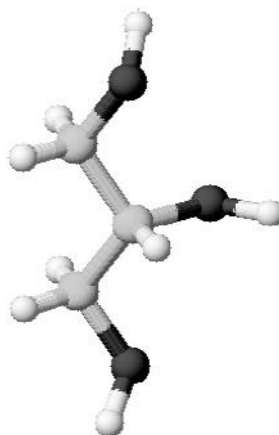
Figura 13: Estrutura dos triglicéridos



Fonte: (RUDNICK; ERHAN, 2006)

A porção da molécula de glicerol tem a estrutura mostrada na Figura 14:

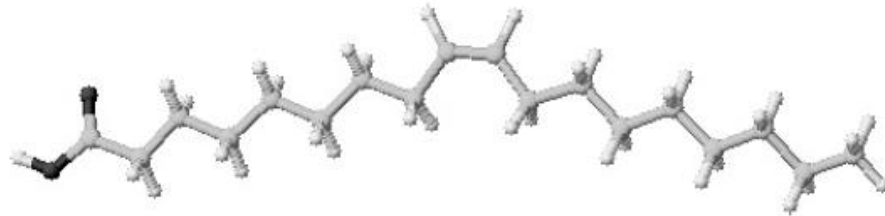
Figura 14: Porção de glicerol de triglicéridos



Fonte: (RUDNICK; ERHAN, 2006)

Os ácidos graxos associados com os óleos vegetais podem ser classificados como sendo saturado, mono-di-tri-insaturados, etc. A Figura 15 a seguir ilustra a estrutura de ácido oleico, um dos ácidos graxos mais comuns encontrados em óleos vegetais que são utilizados como lubrificantes.

Figura 15: Ácido oleico



Fonte:(RUDNICK; ERHAN, 2006]

Um biolubrificante significa um lubrificante que é biodegradável, pode ser definido como uma substância que tem a capacidade de se decompor, em um intervalo de até 1 ano, por meio de processos biológicos naturais em terra carbonácea, água ou dióxido de carbono (WHITBY, 2005 citado por SILVA, 2012). Os óleos de base vegetal possuem algumas características consideradas excelentes como por exemplo:

- Índice de viscosidade elevado;
- Baixa volatilidade;
- São mais biodegradáveis que os óleos minerais;
- São livres de compostos de enxofre;
- Apresentam excelente lubricidade;
- Não apresentam toxicidade;
- Possuem elevado ponto de fulgor.

Porém, os óleos vegetais por apresentarem duplas ligações em sua estrutura, apresentam menor estabilidade oxidativa, gerando compostos insolúveis, aumentando a viscosidade e a acidez do produto (MATOS, 2011); (Becker, 1996 citado por Perez, 2009). Estes processos de oxidação acima mencionada podem ter um efeito significativamente negativo sobre o desempenho da lubrificação. No entanto, o uso de aditivos antioxidantes pode retardar ou prevenir esse processo de oxidação, por proteger o lubrificante da degradação oxidativa e ao mesmo tempo permitir que o óleo satisfaça os requisitos exigidos pela indústria (QUINCHIA, et al., 2011).

Além da melhora na composição química dos óleos vegetais com relação a estabilidade térmica e oxidativa, há uma gama enorme de pesquisas dedicadas a

melhorar o desempenho dos óleos vegetais em aplicações específicas, utilizando diferentes tipos de aditivos e submetendo-os a testes de atrito e desgaste sobre condições controladas, através do uso de tribômetros.

LOVELL et al. (2010), por exemplo, utilizou combinações de biolubrificantes preparados com uma mistura homogênea de partículas da ordem de aproximadamente 20 nm, 600 nm e 4 µm de aditivo em pó, composto por ácido bórico adicionados em óleo de canola. Com base para uma comparação, foi utilizado óleo de canola misturado com pó de bissulfeto de molibdênio variando de 0,5 a 10 µm. Para os testes experimentais de atrito e desgaste foi utilizando um tribômetro do tipo pino sobre disco sob condições ambientes. Após os testes observou-se que os lubrificantes com partículas da ordem de 20 nanômetros de ácido bórico superou significativamente todos os outros lubrificantes no que diz respeito ao atrito e desgaste, chegando a ter uma taxa de desgaste mais que uma ordem de grandeza menor do que o bissulfeto de molibdênio e os lubrificantes com ácido bórico em maiores tamanhos. Isso se deu ao fato da solução não se degradar com o tempo, sendo capaz de separar continuamente as asperezas das superfícies em contato. Também foi observado que a combinação do óleo com partículas de 600 nanômetros e 4 micrometros de ácido bórico apresentou melhor desempenho com relação ao atrito e ao desgaste do que a utilização dessas partículas em óleos separados. No que diz respeito ao tamanho das partículas nos lubrificantes, determinou-se que a presença de partículas pequenas que são capazes de preencher as asperezas da superfície são muito mais importante do que a capacidade dos aditivos maiores de transportar as cargas de contato entre as superfícies. Além disso, as partículas maiores podem atuar como abrasivo, uma vez que são maiores do que a rugosidade da superfície.

RAO e KRISHNA (2008) fizeram uma importante investigação a respeito da utilização de biolubrificante no processo de usinagem, na qual utilizou o ácido bórico para aplicação como fluidos de corte convencional em processos de torneamento. Os resultados obtidos indicaram uma melhora considerável no desempenho de usinagem com ácido bórico comparando a usinagem a seco e molhado. O ácido bórico melhorou o desempenho do processo, reduzindo as forças de corte e desgaste da ferramenta,

devido à formação de um filme de ácido bórico na superfície. Observou também uma melhora no acabamento superficial com a aplicação do ácido bórico, comparado com a usinagem a seco e usinagem com fluidos de corte convencionais. O mecanismo responsável é explicado pelo baixo coeficiente de atrito entre a ferramenta e a peça devido a formação da película lubrificante. Os resultados demonstraram claramente o potencial da aplicação do ácido bórico como um lubrificante para corte de metais.

REEVES, et al. (2012) testaram , através de um tribômetro do tipo pino sobre disco, o desempenho tribológico de vários lubrificantes verdes, tais como: óleo de abacate, canola (colza), milho, oliva, de amendoim, de cártamo, gergelim, além de investigar o desempenho tribológico sobre o efeito do tamanho de partículas de nitreto de boro em óleo de canola durante o contato deslizante. Durante os testes, as partículas de nitreto de boro com tamanhos de 5 μm , 1,5 μm , 0,5 μm , e 70 nm, e suas combinações foram adicionadas ao óleo de canola. Foram utilizados pinos de cobre com uma ponta em forma hemisférica, com as dimensões de 6,35 mm de diâmetro e 50 mm de comprimento. Os discos foram feitos de alumínio e de aço inoxidável com as dimensões de 70 mm de diâmetro e 6,35 mm de espessura. Eles foram polidos com uma rugosidade Ra de $0,3 \pm 0,05 \mu\text{m}$, e para o estudo dos danos utilizou-se microscopia eletrônica de varredura (MEV) e perfilometria óptica. Ao final constatou-se que o óleo de abacate e amendoim, tiveram o menor coeficiente de atrito dos óleos naturais. Em contraste, o óleos de abacate, oliva, e óleo de cártamo obtiveram as mais baixas taxas de desgaste. Dos óleos naturais o óleo de abacate teve o melhor desempenho tribológico. Óleos naturais com altos percentuais de ácidos graxos monoinsaturados particularmente os ácidos oleicos, presentes no óleo de abacate, protegem melhor a interface do pino e disco, resultando em menor atrito e desgaste. As partículas de ordem nanométrica apresentaram o melhor desempenho tribológico nos lubrificantes verdes, quando comparadas com as partículas de ordem micrométrica.

Os aditivos cujos tamanhos eram maiores do que as asperezas transportaram uma porção da carga de contato, resultando numa diminuição de atrito. No entanto, estas partículas maiores também atuaram como abrasivas causando taxas de desgaste maiores. As partículas de tamanho nano presentes no óleo de canola penetraram nas

asperezas criando uma película protetora entre as superfícies de contato impedindo o atrito e o desgaste.

KARIN,P; RICKARD.G, (2003) deram também uma importante contribuição estudando o desempenho tribológico de um carboneto de tungstênio revestido de DLC (mistura de diamante com grafita) em combinação com lubrificantes à base de água. Foram utilizados nesse estudo vários equipamentos para testes tribológicas, inclusive um equipamento baseado no método Reichert, a fim de caracterizar a velocidade de desgaste, coeficiente de atrito e resistência ao ataque do sistema de revestimento, comparando com um rolamento de aço de superfície não revestida. O desgaste no equipamento pino sobre disco foi reduzido devido à presença do revestimento. Os resultados dos testes através do método Reichert mostrou a diminuição da taxa de desgaste para o tribossistema revestido com DLC. A resistência ao desgaste do ensaio são "four ball" foi significativamente melhorada com o revestimento DLC para todos os lubrificantes, no entanto, o melhor efeito foi para os lubrificantes à base de água, em comparação com o óleo puro ou água destilada. Os resultados demonstraram que o desempenho dos sistemas tribológicos com lubrificantes à base de água, podem ser significativamente melhoradas com este tipo de revestimento DLC.

A seguir na tabela 1 temos alguns óleos vegetais e algumas de suas aplicações encontradas no cotidiano:

Tabela 1: Algumas aplicações dos óleos vegetais

Tipos de óleos	Aplicações
Óleo de Canola	Óleos hidráulicos, fluidos de transmissão do trator, fluidos para trabalho de metais, lubrificantes de grau alimentício, óleos penetrantes.
Óleo de Mamona	Lubrificantes de engrenagens, graxas.
Óleo de Coco	Óleos para motores a gás
Óleo de Oliva	Lubrificantes automotivos
Óleo de Palma	Lubrificantes para rolamentos de aço industriais, graxas.
Óleo de Colza	Lubrificantes para motosserras, graxas biodegradáveis, equipamentos agrícolas, fluido hidráulico, combustível, sabão.
Óleo de Cártamo	Tintas de cores claras, combustível diesel, resinas, esmaltes
Óleo de Linhaça	Revestimentos, tintas, lacas, vernizes, corantes
Óleo de Soja	Lubrificantes, biodiesel, fundição de metal, tintas de impressão, tintas, revestimentos, Sabonetes, shampoos, detergentes, pesticidas, desinfetantes.
Óleo de Jojoba	Graxas, indústria de cosméticos, aplicações de lubrificantes.
Óleo de Crambe	Graxas, intermediários químicos.
Óleo de Girassol	Graxa, substituto de combustível diesel.
Óleo de Cuphea	Cosméticos e óleo de motor.
Óleo de Sebo	Óleos de cilindro a vapor, sabão, cosméticos, lubrificantes, plásticos.

Fonte:(RUDNICK; ERHAN, 2006)

2.4 Propriedades dos lubrificantes:

A qualidade de um lubrificante está relacionado com a sua composição química, com processo de refinamento ao qual o óleo cru foi submetido e os tipos de aditivos adicionados em sua composição. A junção desses fatores darão as características necessárias para que os lubrificantes tenham uma boa eficiência e qualidade na função a que são designados (MOURA; CARRETEIRO, 1978).

2.4.1 Viscosidade:

Uma das propriedades físicas mais importantes dos fluídos que atuam como lubrificantes é a viscosidade, que varia de óleo para óleo. A viscosidade é uma medida de rigidez ou atrito interno de um fluido e varia com a temperatura, a pressão e a taxa de cisalhamento (NEALE, 2001, KHONSARI; BOSSER, 2008).

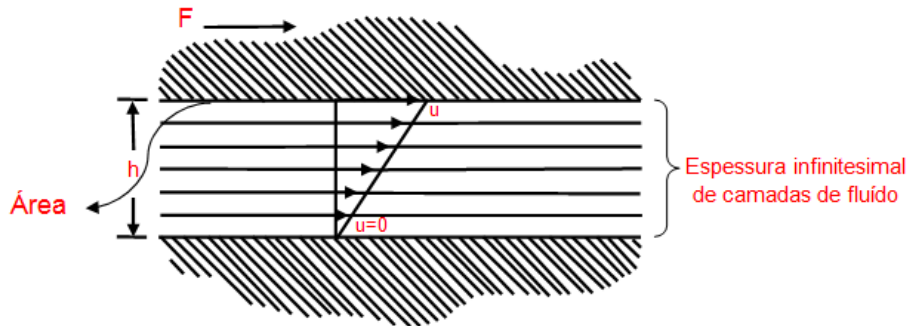
De maneira simples, viscosidade pode ser descrita como a resistência ao escoamento que os fluidos apresentam.

A primeira vista, aparentemente os óleos mais viscosos dariam um melhor desempenho, uma vez que as películas lubrificantes produzidas seriam mais espessas e haveria uma melhor separação das superfícies em contato. Mas, infelizmente, nem sempre é dessa forma, já que os óleos mais viscosos necessitam de mais energia para serem cortados, ocasionando gastos de energias maiores e mais geração de calor, que resulta em um aumento de temperatura nas superfícies de contato podendo levar à falha dos componente (STACHOWIAK, 2001).

2.4.2 Viscosidade dinâmica:

Considere duas superfícies separadas por uma camada de fluido de espessura "h", como mostrado na Figura 16 a seguir:

Figura 16: Representação esquemática do fluido de separação de duas superfícies.



Fonte: (STACHOWIAK, 2001)

A força necessária para mover a superfície superior é proporcional à área "A" e a velocidade "u", dessa forma:

$$F \propto A \times u \quad (1)$$

Assumindo que o filme de fluido que separa as superfícies seja constituída por um certo número de camadas infinitamente finas.

Ao comparar dois filmes de fluidos de diferentes espessuras compostas de camadas equidistantes, se a velocidade da superfície permanece inalterada em ambos os casos, então uma única camada da película mais espessa sofrerá menos deslizamento relativo que no filme fino. Os gradientes de velocidade para estas duas camadas serão diferentes. Uma vez que a película mais espessa contém camadas mais simples, uma força menor será necessária para cortar uma única camada viscosa, de modo que a resistência irá variar conforme o inverso da espessura da película "1 / h".

A força necessária para mover a superfície superior é portanto proporcional a:

$$F \propto A \times \frac{u}{h} \quad (2)$$

Esta relação é mantida para a maioria dos fluidos. Diferentes fluidos apresentam uma constante de proporcionalidade diferente ' η ', chamada de "viscosidade dinâmica".

A relação acima pode ser reescrita como:

$$F = \eta \cdot A \cdot u/h \quad (3)$$

Rearranjando-a temos a equação:

$$\eta = \left(\frac{F}{A}\right) / \left(\frac{u}{h}\right) \quad (4)$$

Ou:

$$\eta = \mu / \left(\frac{u}{h}\right) \quad (5)$$

Onde:

η é a viscosidade Dinâmica [Pas];

μ é o cisalhamento atuante no Fluido [Pa];

u/h é a taxa de cisalhamento [s^{-1}].

2.4.3 Viscosidade cinemática:

A viscosidade cinemática é definida como a razão entre a viscosidade dinâmica e a densidade do fluido:

$$v = \eta / \rho \quad (6)$$

Onde:

v é a Viscosidade Cinemática [m^2/s];

η é a Viscosidade Dinâmica [Pas];

ρ é a Densidade do fluido [Kg/m^3].

Segundo Stachowiak (2001) a unidade mais utilizada para a viscosidade cinemática é Stoke [S]. As densidades dos óleos lubrificantes estão geralmente na faixa de 700 - 1200 [kg/m^3] (0,7 - 1,2 [g/cm^3]). A densidade típica do óleo mineral é de 850 [kg/m^3] (0,85 [g/cm^3]). Para encontrar o valor da viscosidade dinâmica em qualquer óleo em [cP] a viscosidade deste óleo em [cSt] é multiplicada pela sua densidade em [g/cm^3].

Portanto, para um óleo mineral típico a equação de conversão de unidades é:

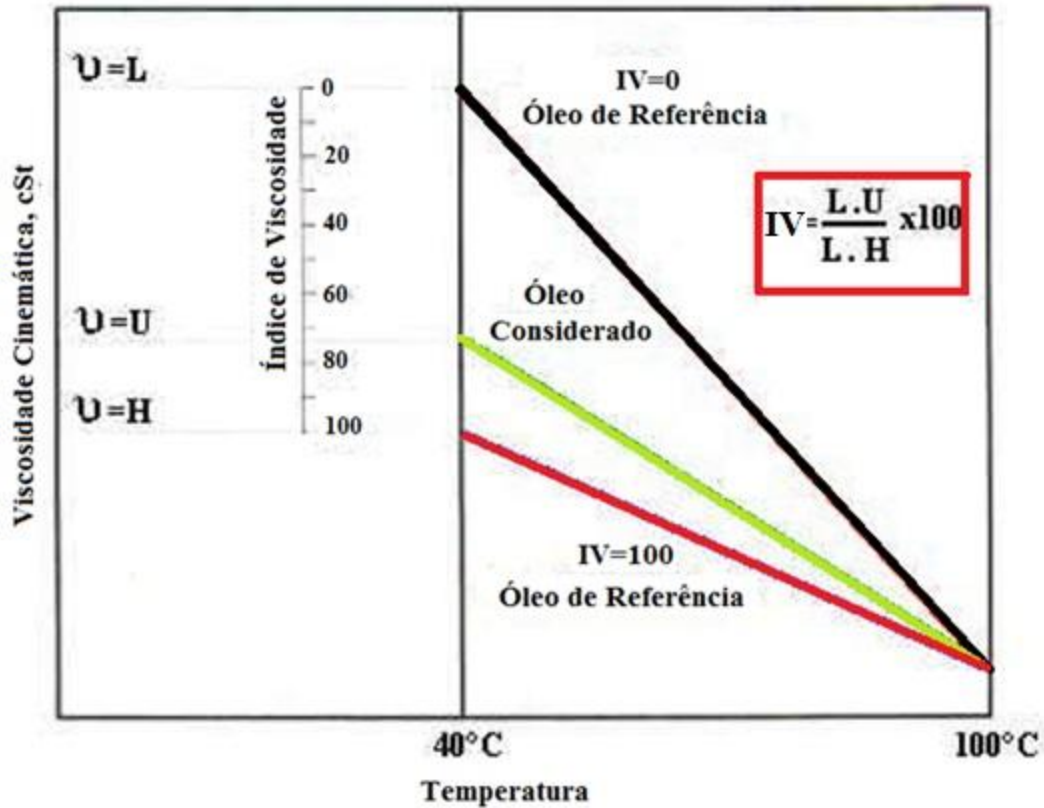
$$\text{Viscosidade em [cP]} = \text{Viscosidade em [cSt]} \times 0,85 \text{ [g/cm}^3\text{]}.$$

2.4.4 Índice de viscosidade:

A viscosidade tende a sofrer mudanças com o aumento ou diminuição da temperatura, essa variação é denominada índice de viscosidade (IV) e quanto maior for esse índice menor será a variação da viscosidade em relação à temperatura.

Esse índice é um número adimensional, usado para indicar que a viscosidade cinemática depende da temperatura do óleo. Essa propriedade se dá através da comparação entre a viscosidade cinemática do óleo testado a 40 °C, com a viscosidade cinemática de dois óleos de referências, um com o IV igual a 0 e o outro igual a 100, cada um com a mesma viscosidade a 100 °C com o óleo testado. As Tabelas para o cálculo do IV de uma viscosidade cinemática medida de um óleo a 40 °C e 100 °C são referenciadas na ASTM D2270 (CUNHA, 2005), como visto na figura 17 a seguir.

Figura 17: Determinação do índice de viscosidade



Fonte: (BARNES, 2002 citado por LAGO, 2007)

2.4.5 Ponto de fulgor:

Ponto de fulgor ou lampejo é a temperatura em que o óleo, quando aquecido, desprende os primeiros vapores que se inflamam momentaneamente (lampejo) ao contato de uma chama. Os óleos para motores e algumas máquinas industriais devem possuir um alto ponto de fulgor, para evitar riscos de incêndio e/ou explosão.

Um aumento ou uma diminuição desse ponto nos indica uma contaminação do óleo, por exemplo, em casos de diminuição do ponto de fulgor pode significar uma contaminação por combustível, caso contrário uma contaminação por água.

O ponto de fulgor permite avaliar as temperaturas de trabalho que um óleo lubrificante pode suportar com absoluta segurança.

2.4.6 Ponto de fluidez:

É a menor temperatura em que um óleo ainda consegue fluir, é conhecido como ponto de gota para graxas ou ponto de congelamento, temperatura essa determinada pelo padrão ASTM D97-47 por meio de resfriamentos sucessivos de amostras de óleo colocadas em frascos de vidro. O teste consiste em verificar se o óleo ainda flui em intervalos de 5 em 5 °F (MOURA; CARRETEIRO, 1978). Se esta superfície permanecer imóvel por mais de 5 segundos, foi atingido o ponto de congelamento do óleo. A temperatura 3 °C acima desta é o ponto de mínima fluidez, a seguir na figura 18 temos a imagem de um equipamento utilizado para este teste:

Figura 18: Equipamento para medir ponto de fluidez

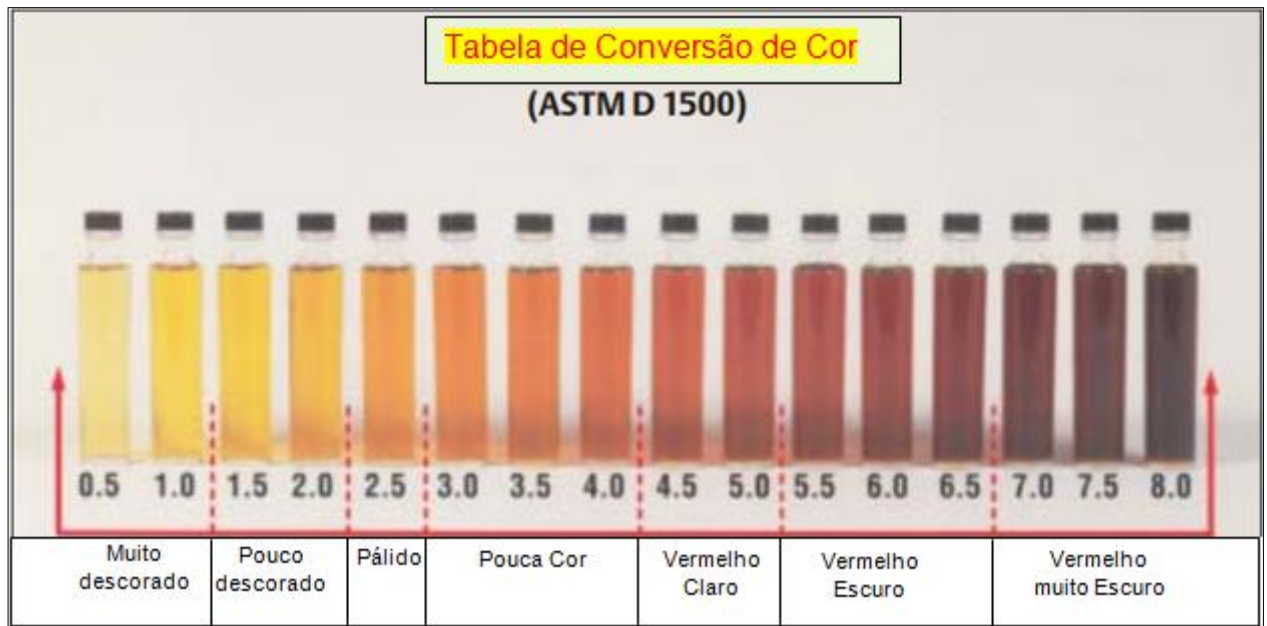


Fonte: (PENSALAB, 2014)

2.4.7 Cor:

As cores dos produtos de petróleo variam amplamente. Os testes, em geral, comparam as amostras com padrões conhecidos, como mostra a figura 19 a seguir:

Figura 19: Escala de comparação de cores



Fonte: (TEXACO, 2005)

O método mais usual é o ASTM – 1500, no qual a amostra líquida é colocada em um recipiente de teste, onde através de uma fonte de luz, esta amostra é comparada com discos de vidro coloridos que variam em valor de 0,5 a 8,0. Quando não é encontrada uma equivalência exata e a cor da amostra fica entre duas cores padrão, relata-se a mais alta. A cor clara de um lubrificante não significa baixa viscosidade, podendo haver óleos brancos com alta viscosidade. A cor também não significa qualidade em um óleo, segundo CPM (1997) a transformação da cor em óleos usados pode indicar diferentes tipos de contaminações, por exemplo:

- Cor cinza - chumbo da gasolina
- Cor preta - fuligem
- Cor branca ou leitosa – água

2.4.8 Estabilidade térmica:

Para Stachowiak (2001), é a resistência do óleo à quebra de suas moléculas ou um reagrupamento das mesmas, sob elevadas temperaturas, sendo que o óleo não precisa estar em contato com o oxigênio presente no ar para que isso ocorra.

O acréscimo de aditivos nesse caso não resultará em nenhum efeito, o óleo só pode ter sua estabilidade térmica elevada devido a uma melhora no seu refinamento.

2.4.9 TAN/TBN:

O TBN (*Total Base Number*) determina se o óleo está controlando os ácidos que surgem no processo de combustão. Quanto maior o TBN, maior a eficácia em eliminar os contaminadores que causam o desgaste e redução dos efeitos corrosivos dos ácidos sobre um período de tempo prolongado.

A medida associada ASTM D2896 ou NBR 05798 varia geralmente de:

- 6 a 80 mg KOH/g em lubrificantes modernos;
- 7 a 10 mg KOH/g para o uso automotriz geral;
- 10 a 15 mg KOH/g para operações a Diesel.

Quando o TBN é medido em 2 mg KOH/g ou menos, o lubrificante é considerado inadequado para a proteção do motor, podendo acarretar a corrosão. Um combustível com teor elevado de enxofre diminuirá o TBN mais rapidamente devido ao aumento de ácido sulfúrico.

O TAN (*Total Acid Number*) representa a massa em mg KOH/g necessária para neutralizar um grama de óleo: é a medida de todas as substâncias contidas no óleo que reagem com hidróxido de potássio. Os constituintes mais comuns de tais produtos ácidos são ácidos orgânicos, sabões de metais, produtos de oxidação, nitritos e nitro

compostos e, ainda, outros compostos, que podem estar presentes como aditivos e que reagem com hidróxido de potássio (MALPICA, 2007 citado por KIMURA 2009).

2.5 Funções dos Lubrificantes:

Aplicação e a seleção de lubrificantes são determinadas pelas funções que eles deverão desempenhar. Em algumas aplicações, como em mancais de instrumentos sensíveis, o controle de atrito é o mais significativo. Em cortes de metais, pode ser mais importante o controle da temperatura (STOETERAU, 2004).

Algumas das principais funções do lubrificante são:

Controle de atrito: O lubrificante tem a capacidade de transformar o atrito sólido em atrito fluído, diminuindo assim a perda de energia.

Controle do desgaste: Tem a capacidade de reduzir o contato entre as superfícies responsáveis pela origem do desgaste.

Controle de temperatura: Quando há o contato metálico, gera-se grande quantidade de calor e a temperatura superficial dos metais pode chegar próximo ao ponto de fusão. A habilidade do lubrificante para absorver e transmitir calor das áreas de alta temperatura para outras em menores temperaturas, é muito importante.

Controle de corrosão: O papel de um lubrificante no controle de corrosão se dá de duas formas. Quando a máquina está parada é usado como protetor e quando a máquina está operando, o lubrificante controla a corrosão cobrindo as partes com um filme protetor que pode ou não conter aditivos que neutralizam materiais corrosivos.

A presença no óleo de contaminantes corrosivos faz com que a tarefa de controlar a corrosão seja mais difícil, como em alguns processos industriais que usam ácidos, soda cáustica e outros materiais corrosivos, exigindo dos lubrificantes uma elevada capacidade protetora (STOETERAU, 2004).

Isolante (elétrico): Em algumas aplicações o lubrificante pode exercer um papel de isolante elétrico, como, por exemplo, em transformadores. As características importantes para óleos isolantes são a alta resistividade elétrica e dielétrica, baixa viscosidade, ponto de fulgor elevado, neutralidade química em relação a metais e materiais isolantes, não conter sedimentos de água e impurezas e estabilidade química em temperaturas altas e localizadas (STOETERAU, 2004).

Transmissão de potência: Utilizado para transmissão de força, como em sistemas hidráulicos.

Amortecimento de choques: transferindo energia mecânica para energia fluida (como nos amortecedores dos automóveis) e amortecendo os choques dos dentes de engrenagens.

Remoção de contaminantes: Em alguns sistemas, os lubrificantes têm a função de remover contaminantes. Em motores de combustão interna, usam-se aditivos do tipo detergente-dispersante para manter as partículas em suspensão e levá-las até os filtros projetados para retê-las. Os lubrificantes são usados, também, para reter contaminantes corrosivos, evitando sua deposição sobre superfícies metálicas, levando-os para filtros dispostos no sistema.

Formação de vedação: Uma função especial dos lubrificantes, e que pode ser desempenhada pelas graxas, é a de servir como elemento de vedação. As graxas são normalmente usadas onde a retenção do lubrificante é um problema e sua ação vedante mantém o lubrificante no mancal e evita a entrada de contaminantes.

2.6 Aditivos:

Os aditivos são compostos químicos que quando adicionados aos óleos básicos tem a capacidade de melhorar ou atribuir determinadas propriedades para que eles desempenhem com excelência o trabalho a que foram designados.

O desenvolvimento de aditivos para melhorar as propriedades e prolongar a vida dos óleos lubrificantes começou por volta de 1920. O uso comercial avançou desde cerca de 1930, junto com as demandas crescentes em automóveis, motores a jato e outras unidades aeroespaciais, hidráulicos e equipamento de alta velocidade e alta pressão (KHONSARI; BOSSER, 2008).

Os aditivos químicos possuem diferentes funções, algumas das principais serão descritas a seguir:

Anticorrosivo:

Esses aditivos protegem as superfícies metálicas lubrificadas do ataque químico da água ou outros contaminantes, eles neutralizam dos ácidos orgânicos, formados pela oxidação do óleo, dos ácidos inorgânicos, no caso de lubrificantes de motores.

No funcionamento dos motores, são formados ácidos sulfúricos e nítricos, devido à presença de enxofre e nitrogênio nos combustíveis, que são altamente corrosivos (CPM, 1997).

Antidesgaste:

Estes aditivos formam um filme protetor nas superfícies metálicas, evitando o rompimento da película lubrificante, quando o óleo é submetido a cargas elevadas. A formação deste filme ocorre a temperaturas pontuais de até 300°C.

Antiferrugem:

Este aditivo possui de certa forma a mesma finalidade que o anticorrosivo, evitar a corrosão dos metais ferrosos pela ação da água ou umidade. A presença de sais na água acelera consideravelmente a ferrugem. Envolvendo as partes metálicas com uma película protetora, o aditivo antiferrugem evita que a água entre em contato com as superfícies (CPM, 1997).

Antiespumante:

Têm a propriedade de fazer com que a espuma formada na circulação normal e agitação do óleo se desfaçam o mais rápido possível. A bomba de óleo quando alimenta as partes a lubrificar com uma mistura óleo-ar, dá-se o rompimento da película de óleo, o contato metal com metal e o conseqüente desgaste. O antiespumante agrupa as pequenas bolhas de ar, existentes no seio do óleo, formando bolhas maiores, que conseguem subir à superfície, onde se desfazem.

Antioxidante:

Têm a propriedade de aumentar a resistência à oxidação do óleo. Retardam a reação com o oxigênio presente no ar, evitando a formação de ácidos e borras e, conseqüentemente, prolongando a vida útil do óleo. Evitando a oxidação, minimizam o aumento da viscosidade e o espessamento do óleo.

Detergente:

Têm a propriedade de manter limpas as partes do motor. Também têm basicidade para neutralizar os ácidos formados durante a combustão.

Dispersantes:

Têm a propriedade de impedir a formação de depósitos de produtos de combustão (fuligem) e oxidação (borra) nas superfícies metálicas de um motor, mantendo estes produtos indesejáveis em suspensão de modo que sejam facilmente retidos nos filtros ou removidos quando da troca do óleo.

Extrema pressão:

Quando a pressão exercida sobre a película de óleo excede certos limites, e quando esta pressão elevada é agravada por uma ação de deslizamento excessiva, a película de óleo se rompe, havendo um contato metal com metal. Se o lubrificante possuir aditivo de extrema pressão, havendo o rompimento da película, este aditivo reage com as superfícies metálicas, formando uma película lubrificante que reduzirá o desgaste. Estes aditivos são comumente utilizados em lubrificantes de engrenagens automotivas e industriais e também em graxas (CPM, 1997).

Melhoradores do Índice de viscosidade:

São responsáveis pela redução da variação da viscosidade em função da temperatura. Esses aditivos são compostos por polímeros de elevado pesos moleculares, que formam uma espécie de nódulos no óleo. À medida que se eleva a temperatura do lubrificante os nódulos se expandem, dificultando o escoamento do óleo (KIMURA, 2009).

Rebaixadores do ponto de fluidez:

Melhoram a fluidez dos óleos quando submetidos a baixas temperaturas, evitando a formação de cristais que restringem o fluxo dos mesmos, eles envolvem os cristais de parafina que se formam a baixas temperaturas, evitando que eles aumentem e se agrupem impedindo a circulação do óleo.

Modificadores de atrito:

Esses aditivos reduzem a energia necessária para deslizar partes móveis entre si, formando uma película que se rompe com o movimento, mas que se recompõe automaticamente. Mais utilizados em óleos de motores (aumento de eficiência), em sistemas de freio úmido, direções hidráulicas e diferenciais autoblocantes (diminuição de ruídos), em transmissões automáticas (melhorar o acionamento das embreagens e engrenagens) e também em graxas para juntas homocinéticas (para o aumento de eficiência). Podem ser substâncias orgânicas (teflon), inorgânicas (grafite, bissulfeto de molibdênio) ou organometálicas (a base de molibdênio ou boro) (TEXACO, 2005).


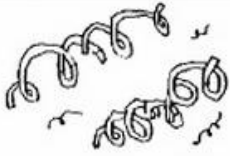
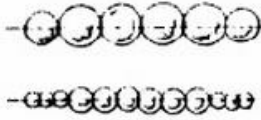

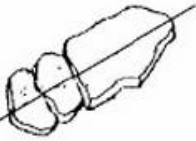
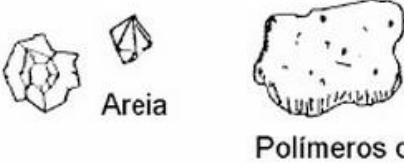
2.7 Análise de partículas de desgaste em óleos lubrificantes:

As análises de partículas de desgaste em lubrificantes são feitas através da presença de partículas no óleo, que são derivadas da deterioração dos componentes existentes nos equipamentos ou contaminação externa. Os lubrificantes também devem ser analisados, para avaliar a sua degradação decorrente de seu uso (NEALE, 2001).

As análises de partículas são feitas através do estudo da quantidade de partículas geradas, tamanho, forma e composição, das superfícies que estão em movimento sem que haja a necessidade de se desmontar o equipamento (BARRACLOUGH et al. 1999; ANDERSON et al., 1999 citado por LAGO 2007).

A figura 20 a seguir contém os desenhos de seis possíveis formatos de partículas de desgaste:

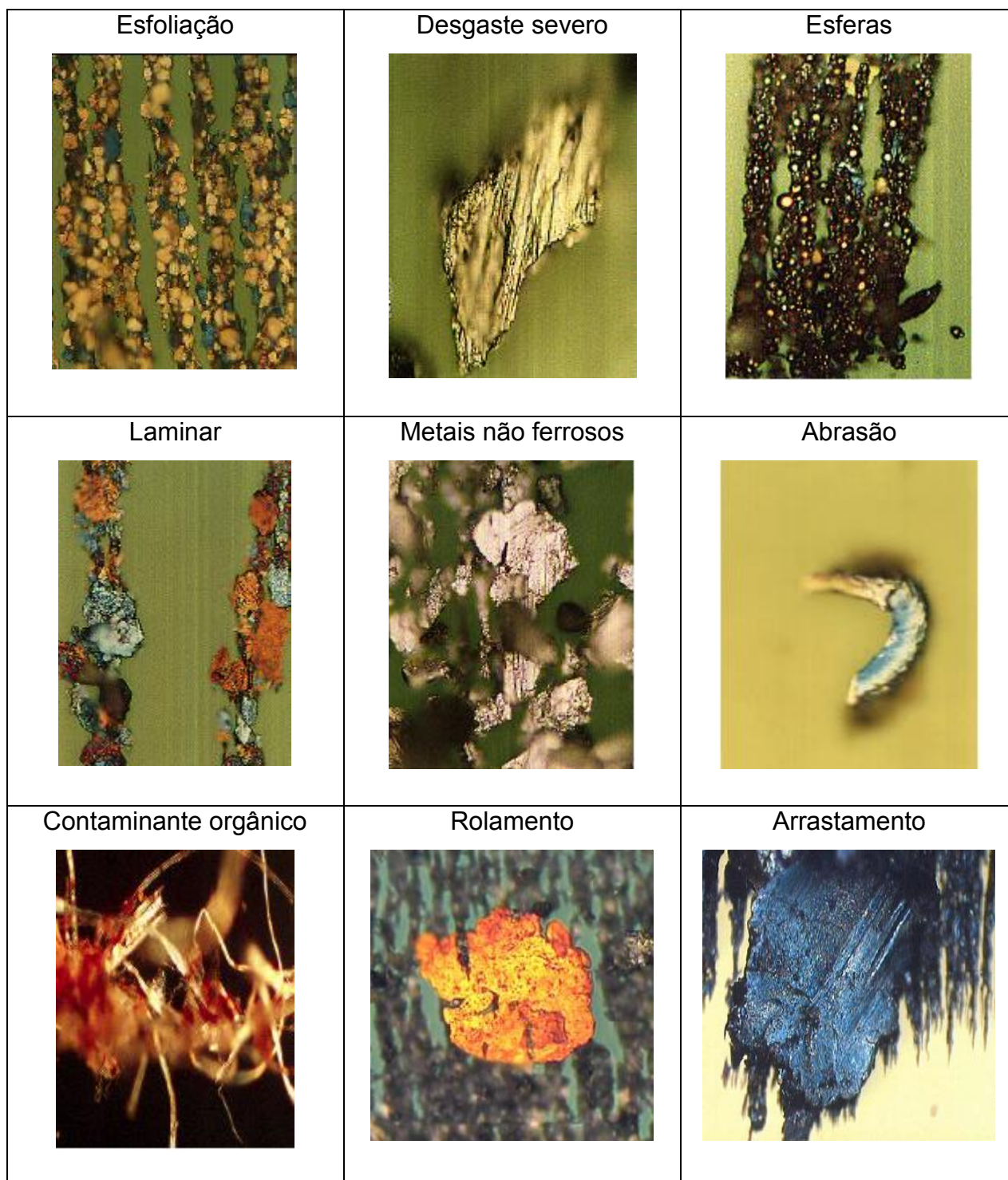
Figura 20: Classificação das partículas de desgaste

1	ESFOLIAÇÃO	2	CORTE POR ABRASÃO
 <ul style="list-style-type: none"> * Escamas * Superfície lisa * 0,5 ~ 5μm 		 <ul style="list-style-type: none"> * Cavacos * Existência de areia * 10 ~ 100μm 	
3	FADIGA (rolamento e engrenagem)	4	ARRASTAMENTO (engrenagens)
 <ul style="list-style-type: none"> * Esferas * ~ Regulares * ~ 3μm 		 <ul style="list-style-type: none"> * Superfície rugosa * Coloração por temperatura * >20μm 	
5	DESGASTE SEVERO POR DESLIZAMENTO	6	PARTÍCULAS DIVERSAS
 <ul style="list-style-type: none"> * Estrias * Corte reto * > 20μm 		 <p>Areia</p> <p>Polímeros de fricção</p>	

Fonte: (BARONI, 2004 citado por LAGO, 2007)

A seguir na figura 21 observamos algumas partículas obtidas através de um microscópio metalográfico.

Figura 21: Partículas de desgaste vistas em microscópio



Fonte: [Apostila Tribolab; Predict]

Arato (2004) descreve uma classificação do nível de desgaste em função das dimensões das partículas, como sendo:

Desgaste normal: A distribuição granulométrica está mais entre 0,1 e 1,0 μm , e as partículas maiores não ultrapassam 10 μm .

Desgaste acentuado: O intervalo de maior concentração das partículas é de 0,1 a 10 μm , e as partículas maiores atingem 100 μm .

Desgaste avançado: Começa a aumentar a concentração de partículas na faixa de 100 μm .

Desgaste catastrófico: A maior concentração de tamanhos de partículas está entre 100 e 1000 μm , considerado um defeito por atrito.

2.8 Algumas técnicas de análise de óleos:

Através da análise dos lubrificantes podemos atuar dentro de uma grande área da engenharia denominada manutenção, sendo possível identificar os primeiros sintomas de desgaste de um componente, além de nos permitir quantificar e traçar um perfil de desgaste do equipamento e componentes.

2.8.1 Ferrografia

A ferrografia iniciou-se na década de 1970 pelos inventores Seiffert e Westcott, devido à necessidade de melhorias nos processos de análise de óleo em motores daquela época. Segundo Kimura (2009), antes disso usava-se o método para quantificar a concentração de partículas, no qual elas eram depositadas em um filtro de papel e posteriormente observadas em um microscópio. Sendo difícil a identificação das formas e as dimensões dessas partículas. A ferrografia é uma técnica que auxilia no monitoramento e diagnose de falhas em máquinas e equipamentos. Através da análise

da morfologia das partículas encontradas nas amostras de lubrificantes é possível determinar os tipos de desgaste que estão ocorrendo, contaminações, qualidade do lubrificante, etc.

Há duas formas de ferrografia: Quantitativa, que consiste em avaliar as condições de desgaste dos componentes de uma máquina por meio da quantificação das partículas suspensas no lubrificante e Analítica, que utiliza a observação das partículas suspensas no lubrificante.

2.8.2 Ferrografia quantitativa:

O método de ferrografia quantitativa ou direta proporciona de maneira rápida e prática uma classificação das partículas presentes no óleo, onde as partículas encontradas são classificadas como sendo:

DL (large particles), partículas grandes, maiores que 5 μm ;

DS (small particles), partículas pequenas, menores que 5 μm .

Através desta técnica, podemos obter informações sobre a severidade do desgaste. Os valores da concentração de partículas de desgaste (WPC), e a porcentagem de partículas grandes (PLP), são derivados desse modo.

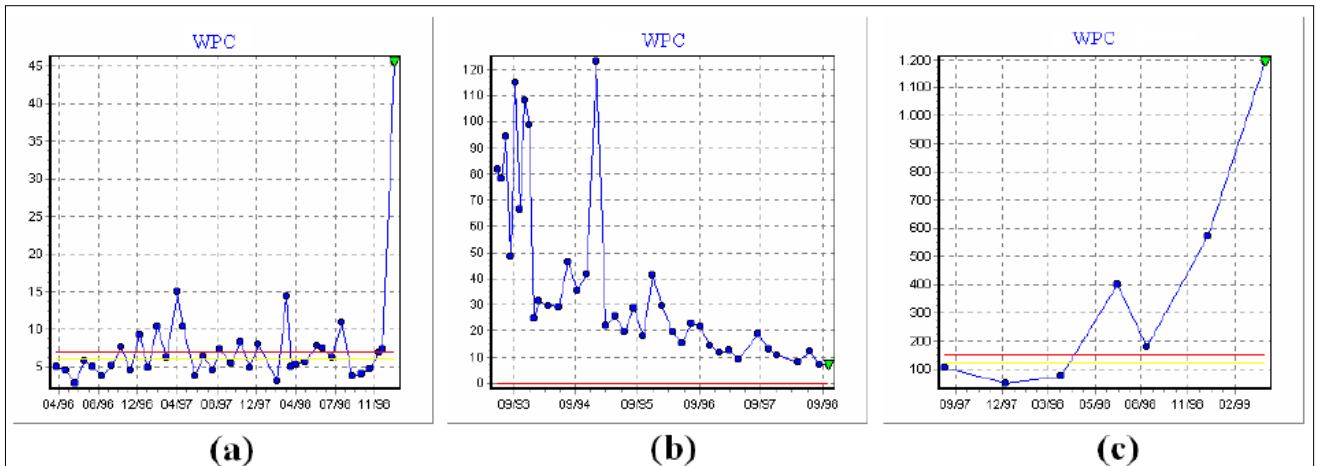
$$\text{WPC} = \text{DL} + \text{DS}$$

$$\text{PLP} = [(\text{DL} - \text{DS}) / (\text{DL} + \text{DS})] \cdot 100$$

Na Figura 22 a seguir, mostra alguns gráficos da evolução da concentração de partículas de desgaste (WPC) em compressores. No gráfico (a), as paradas de um compressor foram adiadas de forma segura com intervenções pequenas e baratas. Gráfico (b), o desgaste de um redutor foi diminuído sistematicamente devido ao melhoramento dos procedimentos de manutenção, melhores materiais e lubrificantes.

Gráfico (c), não tendo sido acatadas as recomendações, um compressor acabou parando em emergência (BARONI; GOMES, 2004 citado por LAGO, 2007).

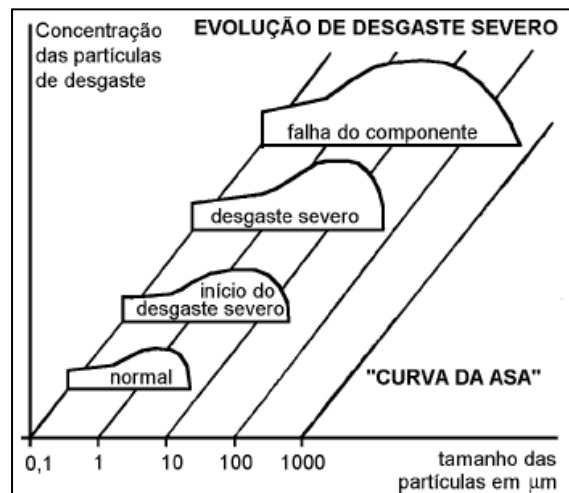
Figura 22: Gráficos da concentração de partículas de desgaste (WPC) pelo tempo



Fonte: (BARONI; GOMES, 2004 citado por LAGO, 2007)

A Figura 23 apresenta um gráfico denominado de “curva de asa”, que demonstra a evolução do desgaste em uma máquina. O desgaste normal varia de $0,1 \mu\text{m}$ até aproximadamente $5 \mu\text{m}$. Partículas maiores que $10 \mu\text{m}$ poderão ocasionar uma falha indesejável do componente.

Figura 23: Gráfico do tipo "curva da asa"



Fonte: [<http://www.essel.com.br/cursos/material/01/Manutencao/33manu2.pdf>]

Um equipamento que serve de exemplo para realização de uma ferrografia direta é o analisador quantitativo de partículas. Esse equipamento examina a amostra por meio de um campo indutivo, que detecta os materiais magnéticos presentes no óleo e apresenta o resultado na forma de um índice denominado índice PQ. Este índice está relacionado diretamente com a quantidade de materiais ferromagnéticos contidos na amostra de óleo. Através desse índice podemos traçar um gráfico de tendências para o equipamento. A seguir na figura 24 temos equipamento de monitor automático de partículas.

Figura 24: Analisador quantitativo de partículas (PQA)



Fonte: (Próprio autor)

2.8.3 Ferrografia analítica:

A técnica de ferrografia analítica tem por objetivo observar a morfologia das partículas, tamanho, cor e analisar visualmente a concentração de partículas em um ferrograma. A ferrografia analítica pode ser utilizada para classificar a natureza dos desgastes de uma máquina, permitindo um estudo profundo das partículas cujo tamanho esteja entre 1 e 250 μm (ARATO, 2004).

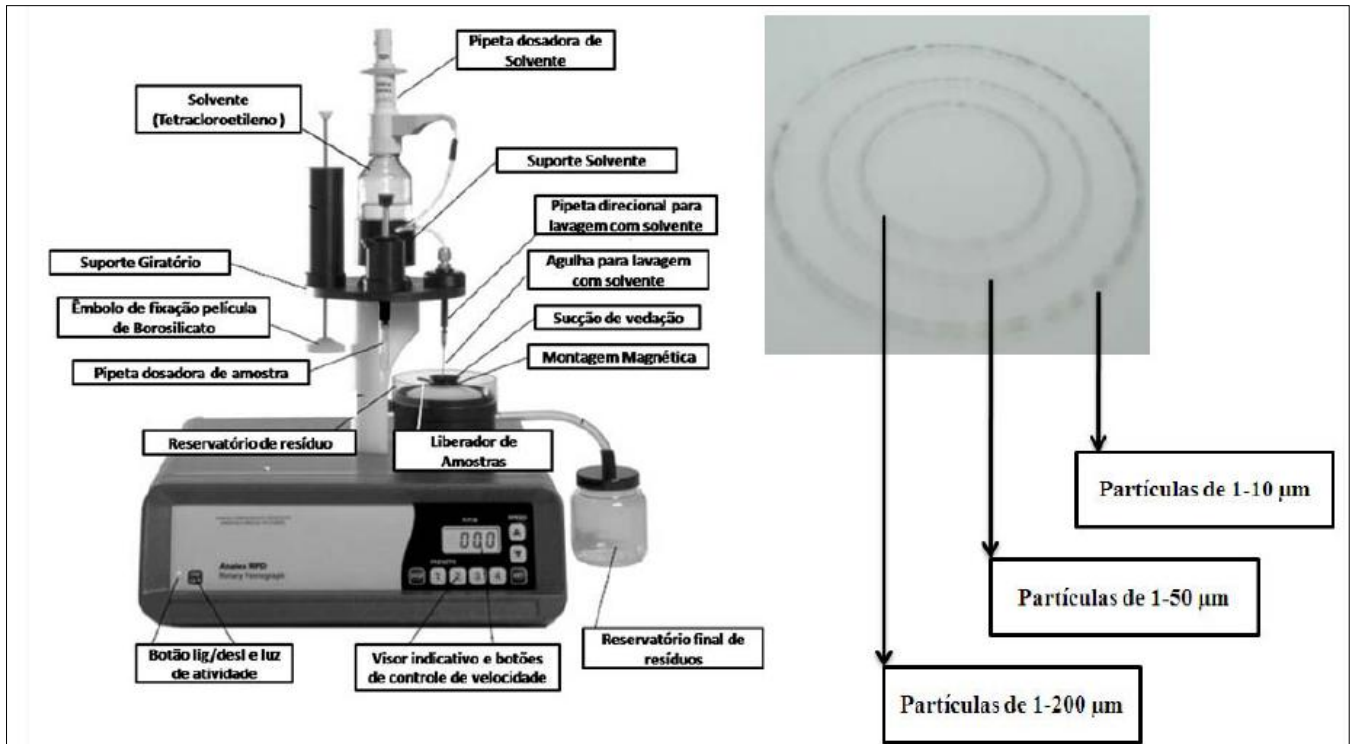
Para realização da ferrografia analítica é necessária a confecção de um ferrograma, para então analisar com o auxílio de microscopia ótica e eletrônica, as formas das partículas para tentar identificar possíveis falhas.

Os ferrogramas são lâminas transparentes onde as partículas magnéticas se depositam sendo separadas em tamanhos por meio de um campo magnético, outras partículas se depositam nas “barreiras” formadas pelas partículas magnéticas.

Para confeccionar um ferrograma podemos utilizar Depositador rotativo de partículas (Rotary Particle Depositor – RPD).

O RPD retém as partículas presentes na amostra de óleo pela ação de forças magnéticas, centrífugas e gravitacionais. As partículas são depositadas sobre uma lâmina de vidro formando três anéis concêntricos, durante esta deposição, ocorre uma separação em relação ao seu tamanho, na qual as partículas maiores (1-200 μm) se depositarão no anel interno, as médias (1-50 μm) no anel intermediário e as partículas pequenas (1-10 μm) no anel externo. Na figura 25 a seguir temos um ferrograma e um equipamento utilizado para confecção do mesmo.

Figura 25: Exemplo de uma ferrograma e um equipamento de RPD



Fonte: (KIMURA, 2009)

2.8.4 Espectrometria de raio X:

O espectrômetro de fluorescência de raios X é um instrumento para determinar quantitativamente os elementos presentes em uma determinada amostra.

Isto é possível através da aplicação de raios X na superfície da amostra e a posterior análise dos fluorescentes raios X emitidos. A técnica de fluorescência de raios X é não destrutiva, para todos os tipos de amostras, incluindo sólidos, líquidos, pós, discos, etc (SHIMADZU, 2013). Na figura 26 temos um espectrômetro de raio-x.

Figura 26: Espectrômetro de Raio - X



Fonte: (Próprio autor)

2.8.5 Viscosímetro:

Como descrito nas propriedades dos óleos, a viscosidade é de extrema importância para fluídos que serão utilizados como lubrificantes e que pode ser simplesmente descrita como a resistência ao escoamento de um fluido.

A viscosidade pode ser determinada em aparelhos chamados de viscosímetros, uns dos mais comuns são:

- Viscosímetro Saybolt (Estados Unidos)
- Viscosímetro Redwood (Inglaterra)
- Viscosímetro Engler (Alemanha)
- Viscosímetro Cinemático (Uso Universal)

Os Viscosímetros Saybolt, Redwood e Engler possuem uma construção semelhante, são compostos basicamente de um tubo cilíndrico, com um estreitamento na parte inferior. Uma determinada quantidade de fluido é contida no tubo que fica mergulhada em banho de água ou óleo com temperatura controlada por termostato.

Uma vez atingida à temperatura a mesma é mantida, deixa-se então escoar o fluído através de um orifício, ao mesmo tempo em que se começa a contagem de tempo. O tempo é parado no instante em que o fluído atinge a graduação do frasco.

A seguir na figura 27 temos um viscosímetro do tipo Saybolt.

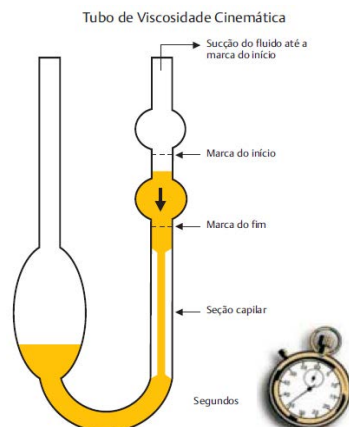
Figura 27: Viscosímetro Saybolt.



Fonte: (QUIMIS, 2013)

Nesse viscosímetro o óleo é aquecido até uma temperatura de 40°C. Após esse primeiro aquecimento escoar-se o óleo medindo o tempo até que atinja a marca de 60 ml do Becker. O tempo que levar para que aconteça esse escoamento é o valor da viscosidade Saybolt a 40°C. Após esta medição, repete-se a operação com a temperatura a 100°C. Com esses valores a 40°C e 100°C, é possível traçar a curva de viscosidade do óleo lubrificante e também achar o valor do índice de viscosidade do óleo em questão. O Viscosímetro Cinemático é basicamente constituído de um tubo capilar de vidro, através do qual se dá o escoamento do fluido, como visto na figura 28.

Figura 28: Viscosímetro Cannon-Fenske



Fonte: (TEXACO, 2005)

2.8.6 Equipamento Cleveland para ponto de fulgor:

Esse ponto pode ser determinado através de um aparelho Cleveland, seguindo a norma ASTM D92-52. A seguir na figura 29 temos a imagem de um equipamento Cleveland:

Figura 29: Equipamento Cleveland para ponto de fulgor



Fonte: (PENSALAB, 2014)

Este aparelho tem a função de aquecer o óleo até o ponto de fulgor previsto, e através de um dispositivo acoplado no equipamento é possível passar uma chama

sobre o lubrificante. Através deste é possível conhecer também o ponto de combustão, que é a temperatura na qual os vapores de óleo queimam de modo contínuo, durante um tempo mínimo de 5 segundos. Outro ponto que é possível identificar é o ponto de auto-inflamação do lubrificante, que é a temperatura na qual o óleo se inflama espontaneamente, sem o contato com a chama. Este ensaio permite estabelecer a máxima temperatura de utilização de um óleo, evitando riscos de incêndio e/ou explosão. Óleos com ponto de fulgor inferior a 150 °C não devem ser empregados para fins de lubrificação. Podemos identificar nesse teste, por exemplo, o nível de contaminação por combustível no óleo (MOURA; CARRETEIRO, 1978).

2.8.7 Titulador:

Como vimos nas propriedades dos óleos, o TBN mede a capacidade que o óleo possui de neutralizar substâncias ácidas presentes. O TBN representa a reserva alcalina do óleo, que é utilizada na neutralização de ácidos fortes formados, por exemplo, na combustão ou oxidação do óleo, tais ácidos são derivados de enxofre e nitrogênio. Na figura 30 a seguir temos a imagem de um titulador automático digital utilizado para medição do TBN e do TAN, que é a medida da quantidade de base, expressa em miligramas de hidróxido de potássio (KOH), necessária para neutralizar (até PH=11) todos os componentes ácidos presentes em 1 grama de amostra.

Figura 30: Titulador automático digital

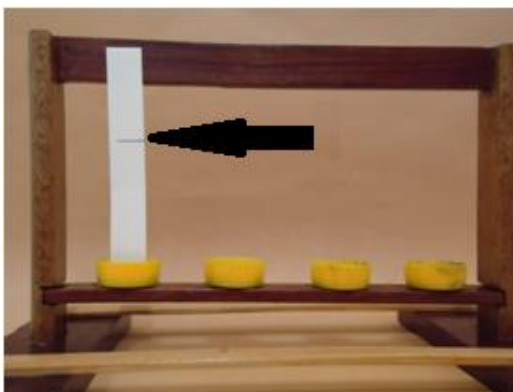


Fonte: (SPLABOR, 2013)

2.8.8 Teste de dispersão:

O teste de dispersão analisa se o aditivo dispersante ainda está presente no óleo lubrificante. Neste teste o lubrificante no recipiente é colocado em contato com uma fita especial como visto na figura 31.

Figura 31: Teste de dispersão.



Fonte: Próprio autor

Se após um tempo de 24h o lubrificante atingir a marca na borda superior da fita indicada na figura, o aditivo dispersante está presente no óleo.

2.8.9 Ferrosκόpio:

O microscópio óptico Bicromático ou ferrosκόpio é utilizado para analisar as lâminas confeccionadas no RPD, identificando a morfologia e o tamanho das partículas existentes no lubrificante. Na figura 32 temos um ferrosκόpio óptico da marca OLYMPUS, modelo BX 41.

Figura 32: Microscópio OLYMPUS BX 41



Fonte: (SPACH, 2013)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

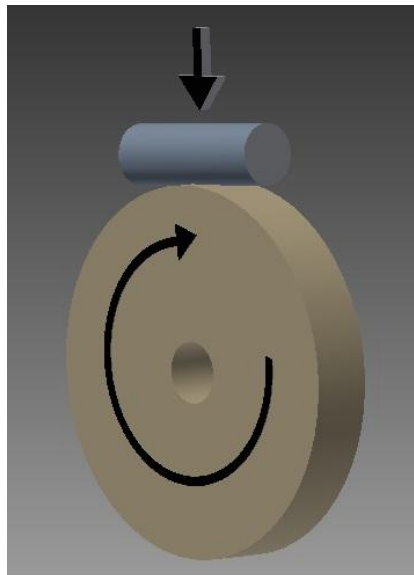
Neste trabalho foi projetada e construída uma máquina simuladora de desgaste para ensaios de lubrificantes.

3.1 Projeto da Máquina Simuladora de Desgaste:

Inicialmente realizou-se um estudo das possibilidades de projetos para fabricação do dispositivo em questão, onde optou-se pelo desenvolvimento de uma máquina baseada no método Reichert.

Este método consiste em uma configuração do tipo cilindro sobre disco, utilizado para testar a capacidade de resistência da película lubrificante sob a aplicação de uma força cisalhante. A seguir na figura 33 temos uma imagem representativa desse método.

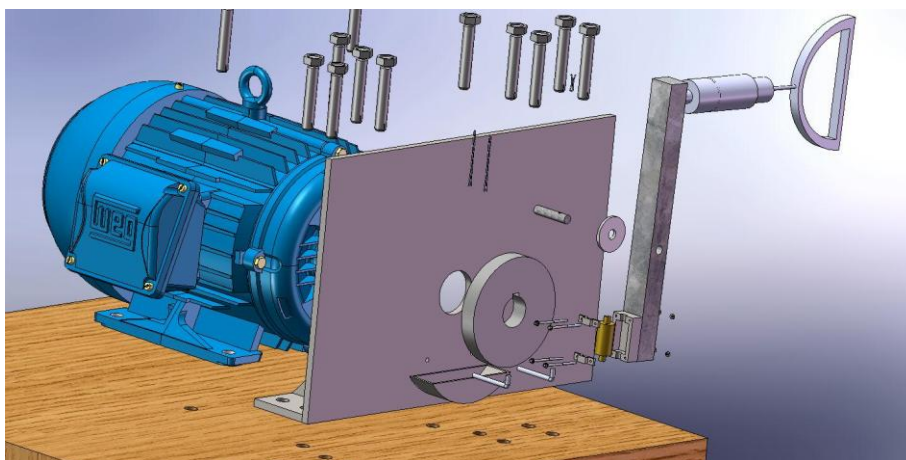
Figura 33: Método Reichert



Fonte: Próprio autor

A figura 34 apresenta a vista explodida de uma das idéias iniciais da máquina a ser projetada, onde teríamos o corpo de prova sendo atritado na lateral do disco e a alavanca responsável pela aplicação da força na posição vertical.

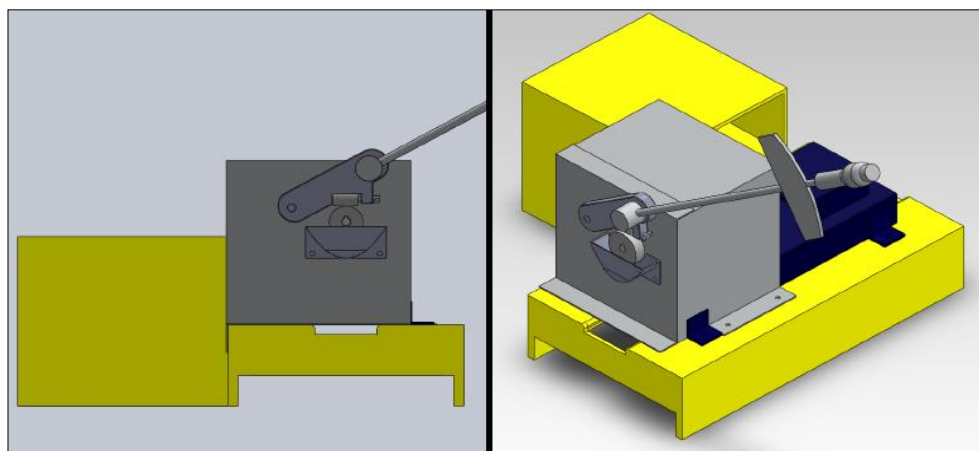
Figura 34: Concepção inicial da máquina de ensaio de atrito e desgaste.



Fonte: Próprio autor

Após discussão optou-se pela construção da máquina conforme vista a seguir na figura 35, onde o corpo de prova a ser atritado se encontra na posição horizontal e acima do disco. Desta forma aumentando a eficiência da lubrificação e facilitando a aplicação da carga pela alavanca, agora em posição horizontal.

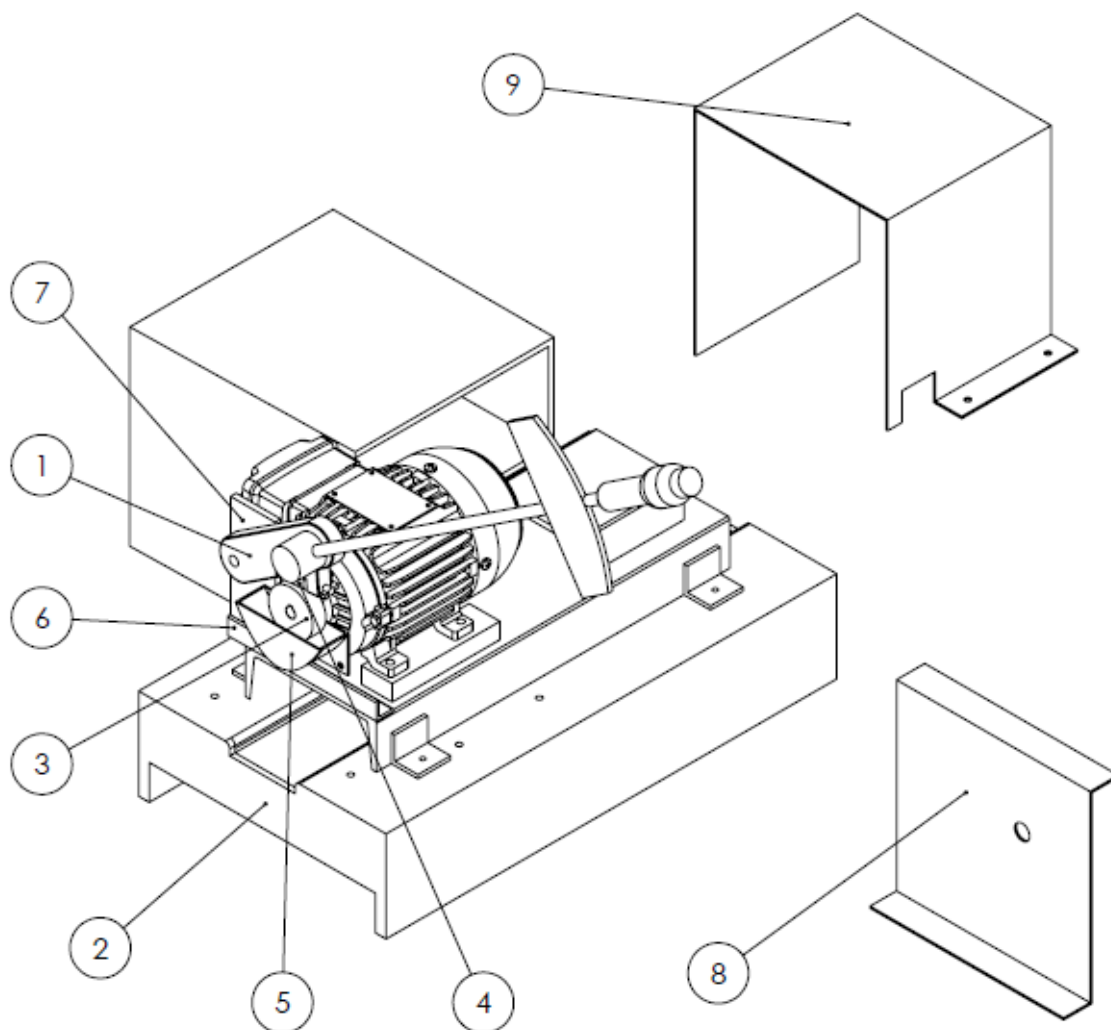
Figura 35: Concepção final da máquina



Fonte: Próprio autor

A seguir na figura 36 temos a vista explodida do equipamento com o nome de cada parte que o constitui.

Figura 36: Vista explodida do dispositivo: (1) Suporte do corpo de prova, (2) Base, (3) Disco, (4) Rolete, (5) Carter, (6) Base do suporte principal, (7) Suporte principal, (8) Parte frontal, (9) Capa de proteção do motor.

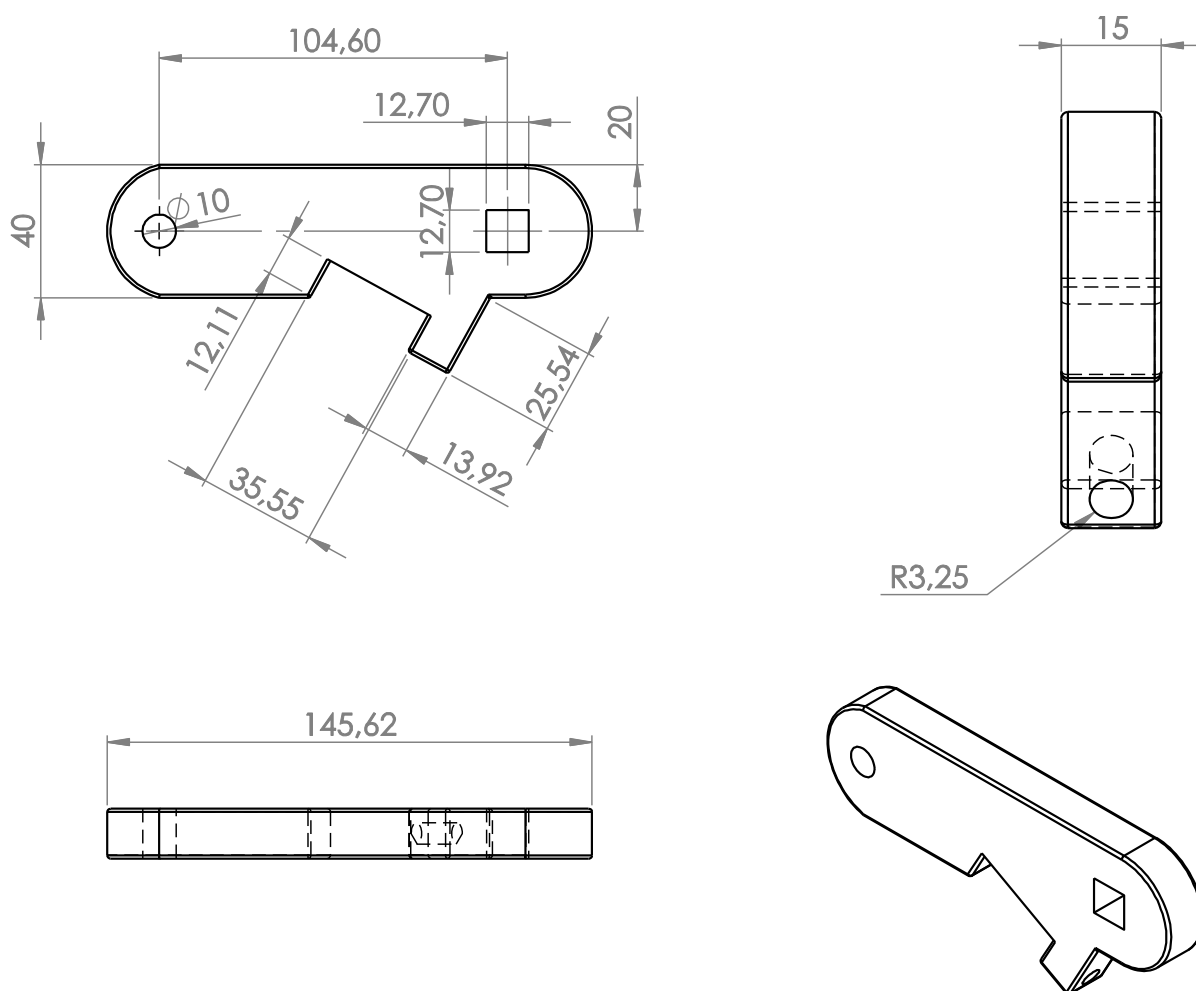


Fonte: Próprio autor

Após o término do projeto iniciou-se o processo de fabricação. Toda construção do dispositivo foi realizada na oficina de engenharia mecânica da Unesp de Ilha Solteira. O simulador constitui-se basicamente de três partes principais.

A primeira delas é o suporte do corpo de prova, que é responsável também pelo acoplamento do torquímetro que exercerá a aplicação da força no dispositivo em questão. A Figura 37 apresenta o desenho desse componente com suas respectivas medidas em mm.

Figura 37: SCP (suporte de corpo de prova)

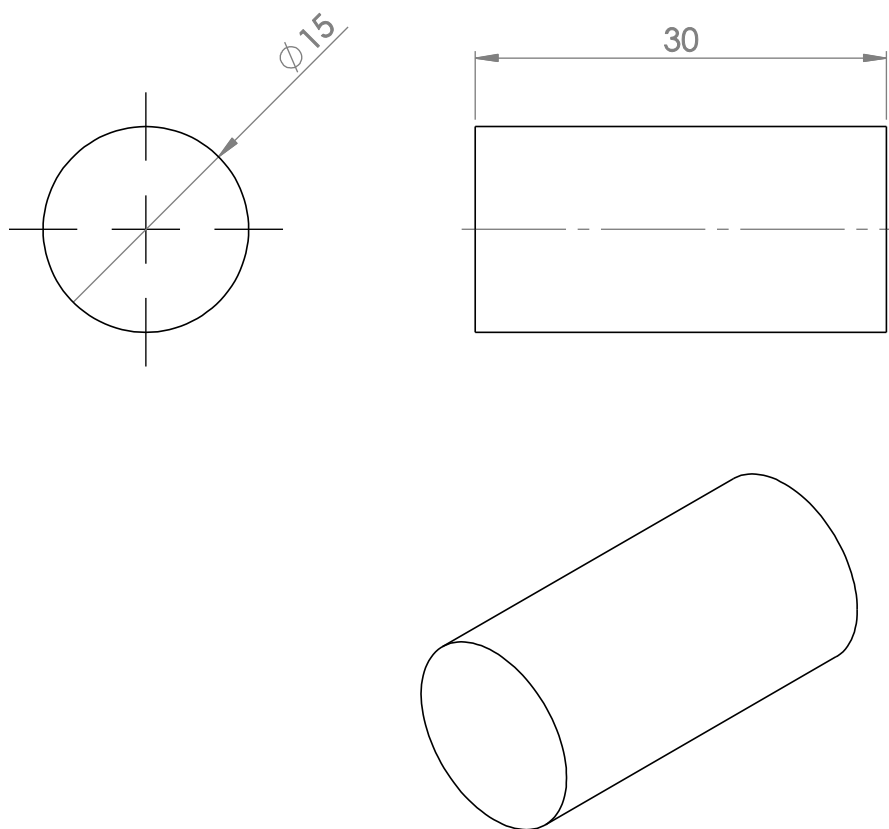


Fonte: Próprio autor

A segunda parte do dispositivo consiste nos corpos de prova. Estes são o cilindro e o disco cujas funções são entrar em contato provocando atrito e desgaste.

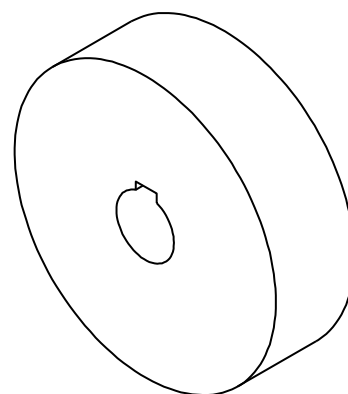
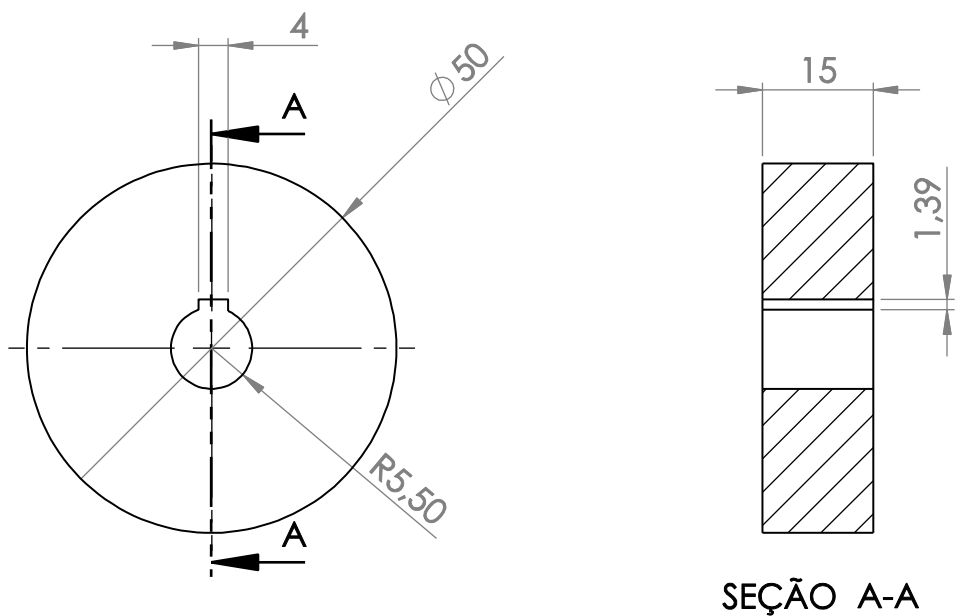
As Figuras 38 e 39 abaixo apresentam os desenhos dos corpos de prova e suas dimensões em mm.

Figura 38: CPC (corpo de prova cilindro)



Fonte: Próprio autor

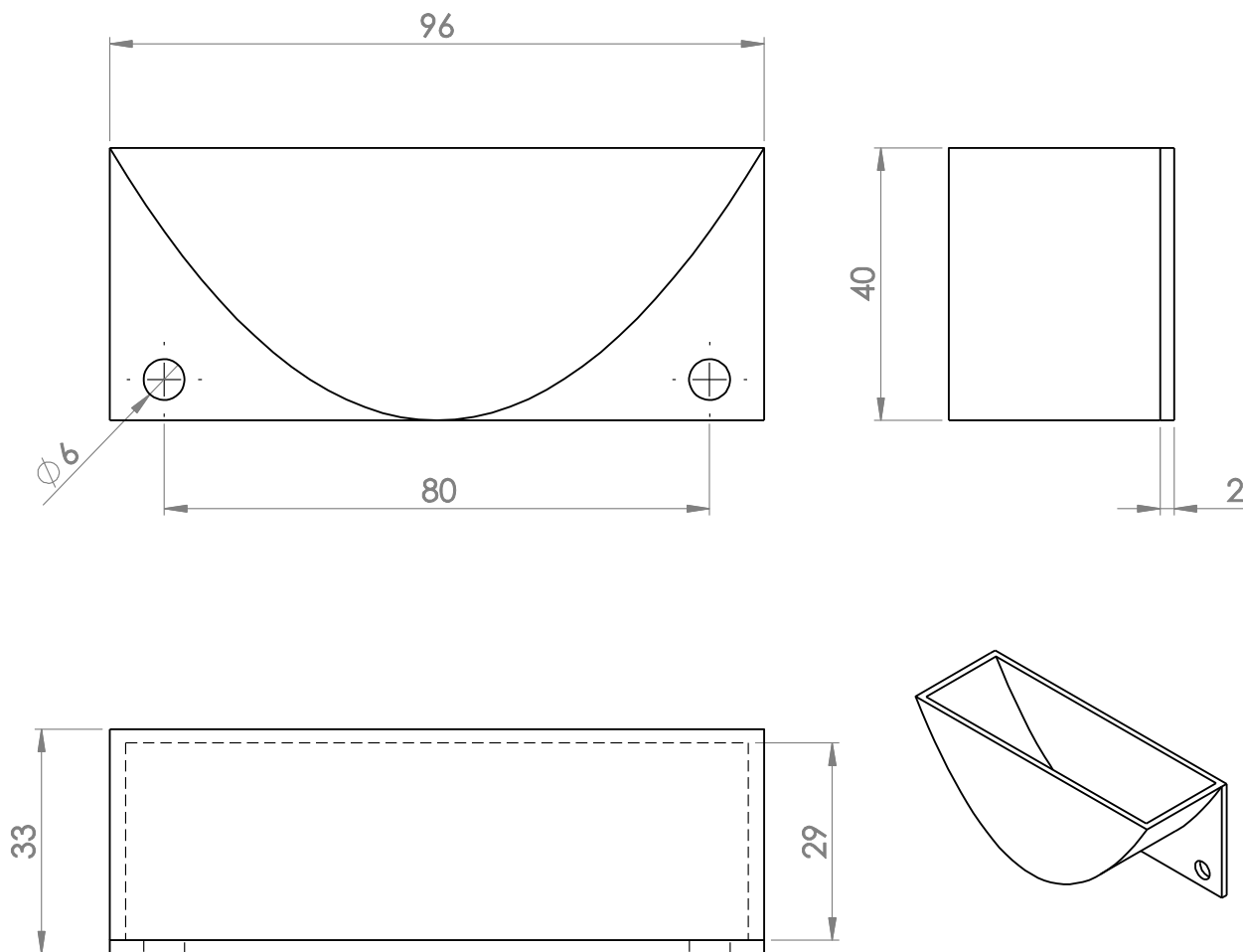
Figura 39: CPD (corpo de prova disco)



Fonte: Próprio autor

A terceira parte do dispositivo é o carter. Este é responsável por lubrificar o sistema e conter as partículas de desgastes provenientes dos ensaios, para posteriores análises. A Figura 40 apresenta esse dispositivo e suas respectivas medidas em mm.

Figura 40: Carter



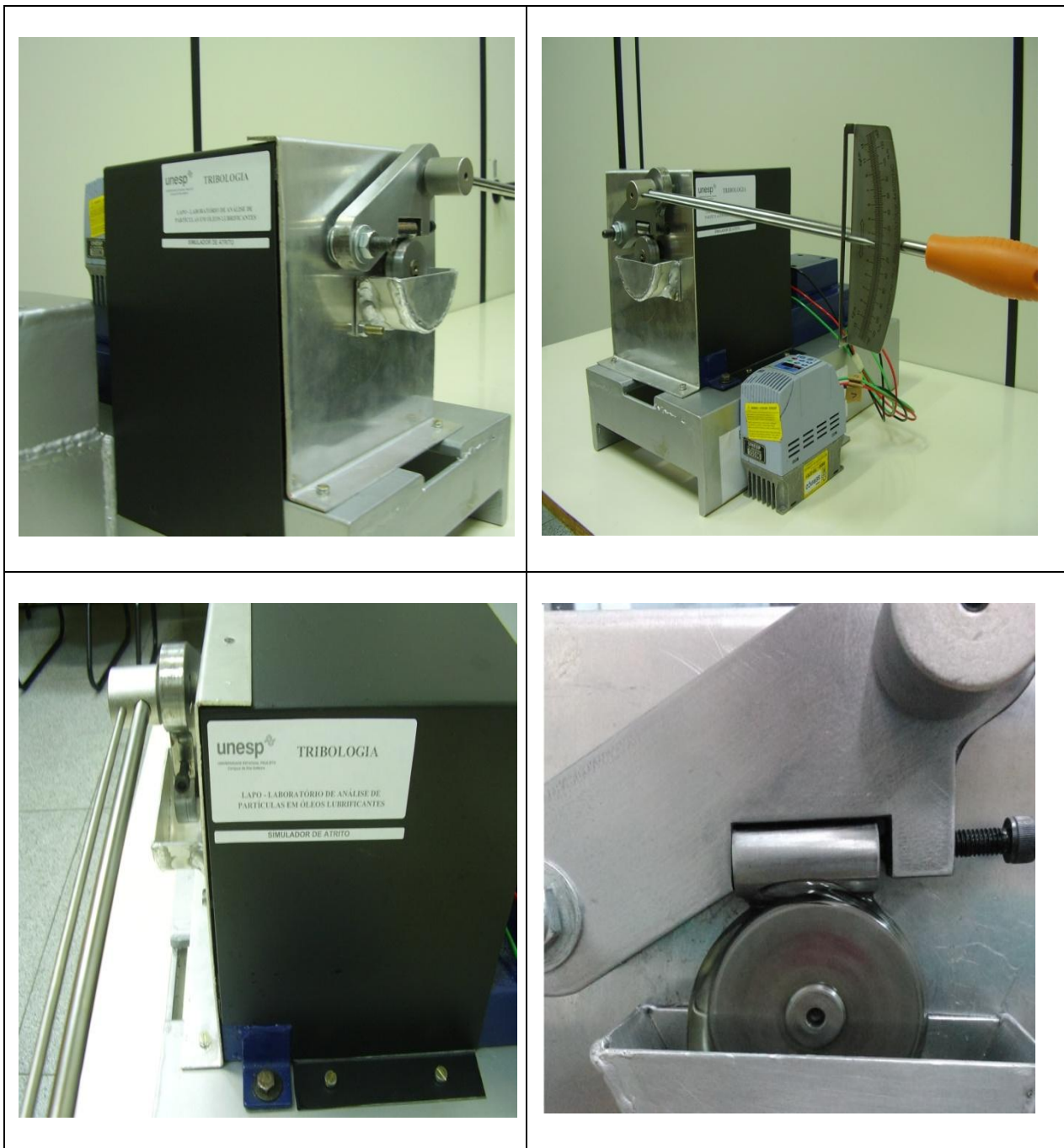
Fonte: Próprio autor

3.2 Funcionamento da Máquina:

O cilindro é fixado no suporte do corpo de prova e depois pressionado sobre o disco rotativo, acoplado no eixo de um motor WEG de potência 0,5 cv (0,37 KW) controlado por um inversor de frequência WEG modelo CFW08 (potência de 0,25 a 20 CV). A força é aplicada no dispositivo através de um torquímetro com o qual é possível exercer um torque variável, ou constante, com a suspensão de um peso em sua

extremidade. O disco em movimento entra em contato com o lubrificante que está no carter, ocasionando a lubrificação do sistema, a seguir na figura 41 a foto do simulador montado com todos os seus componentes.

Figura 41: Fotos do Simulador de desgaste construído



Fonte: Próprio autor.

Os resultados dos testes podem ser obtidos pelos cálculos da perda de volume e massa do cilindro e/ou do disco, através das dimensões desgastadas dos mesmos.

Além das análises para quantificação do desgaste, ensaios de partículas no óleo devem ser realizados, como mais uma fonte de dados para um parecer consistente.

3.3 Fabricação dos corpos de prova:

Os corpos de prova cilíndricos foram usinados em aço ABNT1020 e posteriormente polidos. Para o polimento fez-se o uso de lixas de ferro com granulometria de 100 mesh e lixas d'água de 80, 120, 400, 600 e 1200 mesh, deixando os cilindros com uma rugosidade R_a de $0,23 \pm 0,05 \mu\text{m}$. A figura 42 mostra os corpos de prova usinados.

Figura 42: Corpos de prova polidos (cilindros-aço ABNT 1020)



Fonte: Próprio autor

Os corpos de prova em formato de disco foram usinados em aço ABNT 1045, e posteriormente deu-se um polimento com as lixas de ferro de 100 mesh e lixas d'água de 80, 120, 400, 600 e 1200 mesh. Após isso os discos passaram por um tratamento térmico.

Como esses discos foram utilizados para mais de um ensaio, a cada novo ensaio os mesmos foram lixados com uma lixa de ferro de 80 mesh, dando uma maior rugosidade aos mesmos, mantendo um padrão entre os testes, deixando-os com uma rugosidade Ra de $0,91 \pm 0,05 \mu\text{m}$. A figura 43 mostra esse corpo de prova.

Figura 43: Corpo de prova (disco-aço ABNT1045)



Fonte: Próprio autor

O tratamento térmico realizado foi a têmpera representada na figura 44, com o intuito de aumentar a dureza do disco, para que nos ensaios o maior desgaste ocorresse nos cilindros.

Figura 44: Tratamento térmico – têmpera



Fonte: Próprio autor

Após o tratamento térmico mediu-se a dureza dos discos em um equipamento Rockwell, cuja dureza que estava em 23, foi aumentada para uma dureza de 42 Rockwell HR.

3.4 Procedimentos para realização do ensaio:

Os ensaios foram realizados com tempo, carga, velocidade e quantidade de lubrificante constante. Essas variáveis do processo foram escolhidas mediante a alguns testes como explicado a seguir:

- O tempo de execução do experimento foi escolhido de acordo com a intensidade do desgaste, para que não tivesse uma taxa muito elevada e nem muito baixa, de modo a facilitar as análises desse fenômeno.
- A velocidade e a quantidade de lubrificante foram determinadas pela capacidade de lubrificação do sistema, ou seja, escolhidos de forma que o sistema fornecesse a lubrificação constante sem derramar o lubrificante para fora do Carter.
- A carga aplicada levou-se em consideração a capacidade do motor e também a quantidade de desgaste, utilizou-se uma carga que não travasse o motor e fornecesse um desgaste necessário para os testes.

O tempo de cada ensaio foi de 15 minutos, a carga aplicada em cima do cilindro foi de aproximadamente 17 kg, a velocidade tangencial equivalente a 1,18 metros por segundo e 40 ml de óleo lubrificante.

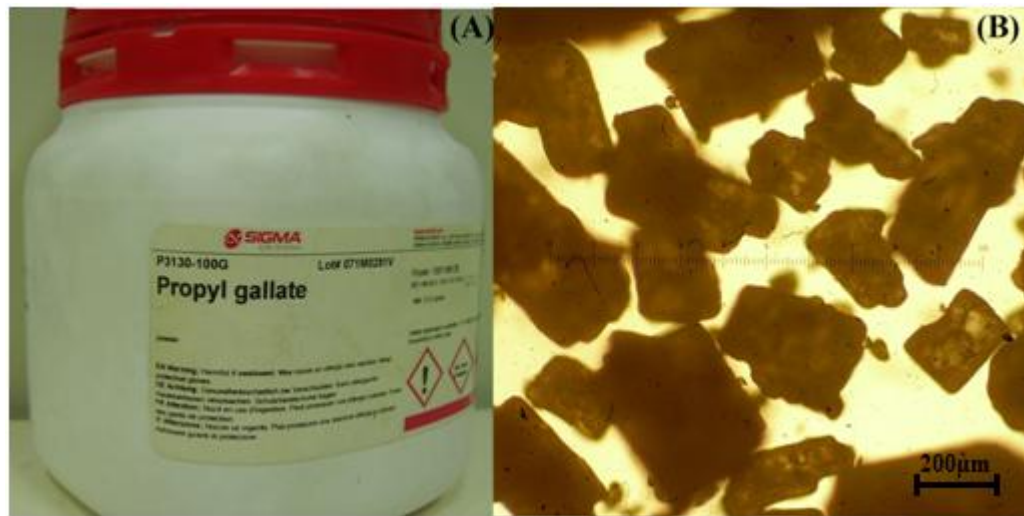
Após os ensaios realizados tirou-se fotos dos roletes desgastados, para demonstração da proporção do desgaste com relação à mudança dos óleos e as variações de aditivos.

3.5 Aditivos e óleos utilizados nos ensaios:

Foram utilizados 4 tipos de aditivos no trabalho. Um deles é o propil galato, que é um éster originado da condensação de propanol e ácido gálico. Este aditivo é muito utilizado em alimentos, como óleos e gorduras, para impedir que se tornem rançosos, protegendo contra a oxidação que ocorre através de um mecanismo catalítico (ELER, 2009).

A Figura 45 a seguir apresenta o recipiente comercial do aditivo em pó de propil galato junto à imagem microscópica do tamanho de suas partículas.

Figura 45: (A) Recipiente de propil galato, (B) Partículas microscópicas de propil galato variando de 200 a 700 μm .



Fonte: Próprio autor

Como visto, os óleos vegetais apresentam baixa estabilidade oxidativa, gerando compostos insolúveis que aumentam a viscosidade e a acidez do produto, motivo principal para o uso desse aditivo, por se tratar de um antioxidante, pode retardar ou prevenir esse processo de oxidação protegendo o lubrificante.

Outro aditivo usado foi o ácido bórico, utilizado como substância anti-séptica e desinfetante em infecções de mucosas, na proteção de madeiras expostas (como dormentes e vigas) e como protetor contra corrosão (BORAX, 2014).

A Figura 46 a seguir apresenta o recipiente comercial do aditivo em pó de ácido bórico junto à imagem microscópica do tamanho de suas partículas.

Figura 46: (A) Recipiente de ácido bórico, (B) Partículas microscópicas de ácido bórico variando de 50 a 600 μm .



Fonte: Próprio autor

Como visto no funcionamento de motores, há a formação de compostos altamente corrosivos como ácidos sulfúricos e nítricos, devido à presença de enxofre e nitrogênio nos combustíveis, um dos motivos pelo qual foi escolhido esse aditivo.

Outro fator determinante para a escolha do ácido bórico foram às diversas pesquisas na área tribológica utilizando essa substância, algumas delas foram citadas nesse trabalho.

Utilizou-se também o Molykote A-2 um aditivo de extrema pressão. Trata-se de uma suspensão estável de micropartículas de Bissulfeto de Molibdênio (MoS_2) em óleo mineral neutro e que não reage quimicamente com o óleo. Realiza ação mecânica no processo de deslizamento e não apresenta toxicidade, motivo pelo qual foi escolhido.

Essas micropartículas de Bissulfeto de Molibdênio aderem às ranhuras das peças em atrito, criando uma camada protetora de 3 a 4 μm de espessura, o que evita o

atrito direto entre metais e prolonga a vida útil dos componentes (LUMOBRAS, 2014), a seguir na figura 47 temos a imagem desse aditivo.

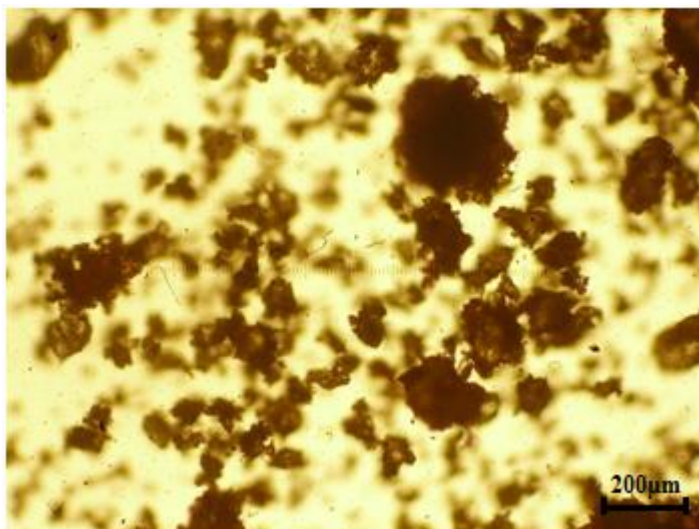
Figura 47: Molykote A-2



Fonte: Próprio autor

Por fim o último aditivo escolhido foi uma substância de origem vegetal devido a sua biodegradabilidade e não toxicidade, a seguir na figura 48 a imagem microscópica dessa substância.

Figura 48: Aditivo em pó de origem vegetal com partículas de $\pm 250 \mu\text{m}$ e com partículas menores que $100 \mu\text{m}$.



Fonte: Próprio autor

Com relação aos óleos testados, foram utilizados 5 tipos diferentes, 4 óleos de base vegetal e um mineral, todos com variações de aditivos em suas composições como mostrado nas tabelas 2 a 6 seguir.

Tabela 2: Tabela de soja

Tipo de (Bio)Lubrificante	Tipo de Aditivo	Aditivo (%)	Denominação da amostra
Soja (A)	Propil Galato (A)	0 (A)	AAA
		2.5 (B)	AAB
		5 (C)	AAC
	Ácido Bórico (B)	0 (A)	ABA=AAA
		2.5(B)	ABB
		5 (C)	ABC
	Molykote (C)	0 (A)	ACA=AAA
		2.5(B)	ACB
		5 (C)	ACC
	Aditivo de origem vegetal (D)	0 (A)	ADA=AAA
		2.5 (B)	ADB
		5 (C)	ADC
	Combinado (A)+(B)+(C)+(D) = (E)	0 (A)+2.5(B)+2.5(C)+2.5(D)= (A)	AEA
		2.5 (A)+0(B)+2.5(C)+2.5(D) = (B)	AEB
		2.5 (A)+2.5(B)+0(C)+2.5(D) = (C)	AEC

Fonte: Próprio autor

Tabela 3: Tabela de canola

Tipo de (Bio)Lubrificante	Tipo de Aditivo	Aditivo (%)	Denominação da amostra
Canola (B)	Propil Galato (A)	0 (A)	BAA
		2.5 (B)	BAB
		5 (C)	BAC
	Ácido Bórico (B)	0 (A)	BBA=BAA
		2.5(B)	BBB
		5 (C)	BBC
	Molykote (C)	0 (A)	BCA=BAA
		2.5(B)	BCB
		5 (C)	BCC
	Aditivo de origem vegetal (D)	0 (A)	BDA=BAA
		2.5 (B)	BDB
		5 (C)	BDC
	Combinado (A)+(B)+(C)+(D) = (E)	$0(A)+2.5(B)+2.5(C)+2.5(D) =$ (A)	BEA
		$2.5(A)+0(B)+2.5(C)+2.5(D) =$ (B)	BEB
		$2.5(A)+2.5(B)+0(C)+2.5(D) =$ (C)	BEC

Fonte: Próprio autor

Tabela 4: Tabela de milho

Tipo de (Bio)Lubrificante	Tipo de Aditivo	Aditivo (%)	Denominação da amostra
Milho (C)	Propil Galato (A)	0 (A)	CAA
		2.5 (B)	CAB
		5 (C)	CAC
	Ácido Bórico (B)	0 (A)	CBA=CAA
		2.5(B)	CBB
		5 (C)	CBC
	Molykote (C)	0 (A)	CCA=CAA
		2.5(B)	CCB
		5 (C)	CCC
	Aditivo de origem vegetal (D)	0 (A)	CDA=CAA
		2.5 (B)	CDB
		5 (C)	CDC
	Combinado (A)+(B)+(C)+(D) = (E)	$0(A)+2.5(B)+2.5(C)+2.5(D) =$ (A)	CEA
		$2.5(A)+0(B)+2.5(C)+2.5(D) =$ (B)	CEB
		$2.5(A)+2.5(B)+0(C)+2.5(D) =$ (C)	CEC

Fonte: Próprio autor

Tabela 5: Tabela de girassol

Tipo de (Bio)Lubrificante	Tipo de Aditivo	Aditivo (%)	Denominação da amostra
Girassol (D)	Propil Galato (A)	0 (A)	DAA
		2.5 (B)	DAB
		5 (C)	DAC
	Ácido Bórico (B)	0 (A)	DBA=DAA
		2.5(B)	DBB
		5 (C)	DBC
	Molykote (C)	0 (A)	DCA=DAA
		2.5(B)	DCB
		5 (C)	DCC
	Aditivo de origem vegetal (D)	0 (A)	DDA=DAA
		2.5 (B)	DDB
		5 (C)	DDC
	Combinado (A)+(B)+(C)+(D) = (E)	$0(A)+2.5(B)+2.5(C)+2.5(D) =$ (A)	DEA
		$2.5(A)+0(B)+2.5(C)+2.5(D) =$ (B)	DEB
		$2.5(A)+2.5(B)+0(C)+2.5(D) =$ (C)	DEC

Fonte: Próprio autor

Tabela 6: Tabela de mineral

Tipo de (Bio)Lubrificante	Tipo de Aditivo	Aditivo (%)	Denominação da amostra
Mineral (E)	Propil Galato (A)	0 (A)	EAA
		2.5 (B)	EAB
		5 (C)	EAC
	Ácido Bórico (B)	0 (A)	EBA=EAA
		2.5(B)	EBB
		5 (C)	EBC
	Molykote (C)	0 (A)	ECA=EAA
		2.5(B)	ECB
		5 (C)	ECC
	Aditivo de origem vegetal (D)	0 (A)	EDA=EAA
		2.5 (B)	EDB
		5 (C)	EDC
	Combinado (A)+(B)+(C)+(D) = (E)	$0(A)+2.5(B)+2.5(C)+2.5(D) =$ (A)	EEA
		$2.5(A)+0(B)+2.5(C)+2.5(D) =$ (B)	EEB
		$2.5(A)+2.5(B)+0(C)+2.5(D) =$ (C)	EEC

Fonte: Próprio autor

Durante a realização dos ensaios, utilizou-se uma balança semi-analítica da fabricante Marte Científica, série UX-4200H, com precisão de 0,01 g, para pesar os cilindros antes e após cada teste. As temperaturas dos óleos também foram medidas antes e após os ensaios utilizando um termômetro de precisão da fabricante Incoterm.

3.6 Análise dos Lubrificantes

Após os ensaios de desgaste nos cilindros, os lubrificantes foram analisados através de algumas técnicas de análise de óleo como RPD, PQA e Espectrometria de Raio X.

RPD

Antes da execução dos testes de RPD, o óleo analisado deve ser aquecido a uma temperatura de 60° C, diminuindo sua viscosidade, de modo que ele possa ser trabalhado da melhor forma no equipamento. Para tal, usou-se um forno elétrico capaz de controlar a velocidade de variação da temperatura interna, a temperatura final do forno e o tempo que ele deve permanecer nesse patamar.

A figura 49 a seguir mostra o forno utilizado, marca EDG modelo 7000.

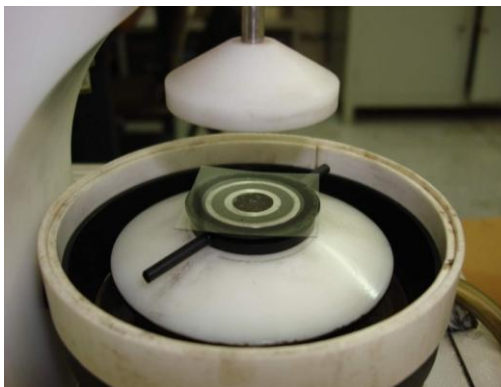
Figura 49: Forno elétrico.



Fonte: (CUERVA, 2013)

Enquanto o óleo chega a temperatura estabelecida, faz-se a preparação do equipamento. Então, posiciona-se a lâmina de vidro na ventosa de borracha do RPD e aplica-se uma pressão através do dispositivo de acrílico do aparelho para que a lâmina fique segura pela ventosa de borracha, conforme Figura 50.

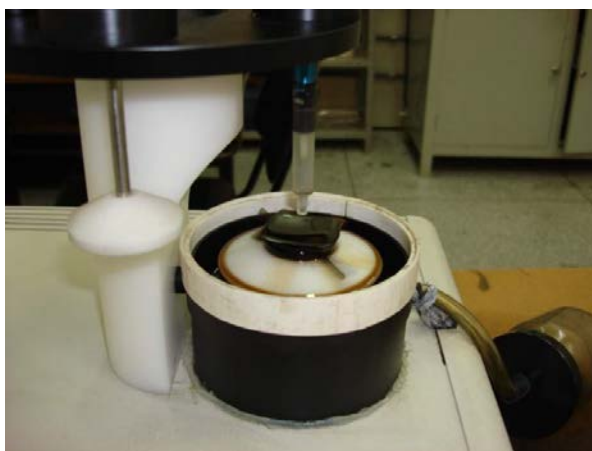
Figura 50: Lâmina de vidro presa à ventosa.



Fonte: (CUERVA, 2013)

Assim que a amostra de óleo atingir a temperatura adequada para os testes (60° C), retira-se o béquer do forno e agita-se o conteúdo do mesmo com um bastão de vidro, para que a amostra fique homogênea e as partículas a serem analisadas, que estavam decantadas, voltem a ficar suspensas no óleo. Logo em seguida deve-se com o auxílio de uma pipeta coletar o óleo do béquer e colocar algumas gotas na lâmina de vidro que está girando a 70 rpm, segundo regulagem no aparelho, este processo requer cuidado, por isso a amostra deve ser colocada lentamente, conforme figura 51.

Figura 51: Óleo lubrificante colocado sobre a lâmina de vidro girando à 70 rpm.



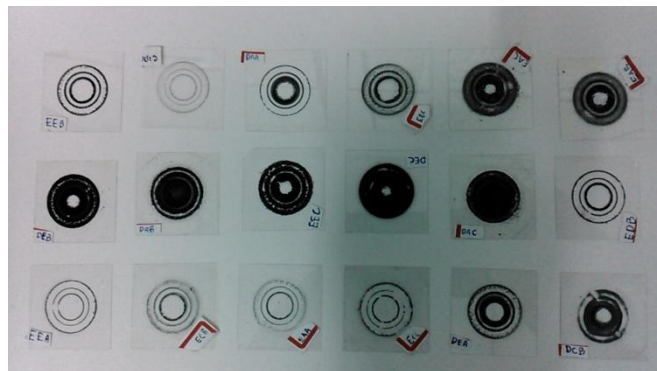
Fonte: (CUERVA, 2013)

Com a lâmina rodando em 70 rpm é pingado sutilmente 2 ml de Tetracloroetileno. O processo é feito com a ajuda de uma seringa graduada. No próximo passo deve-se aumentar a velocidade no aparelho para 100 rpm e reaplicar o Tetracloroetileno. Deixa-se a lâmina girar à 100 rpm por um minuto para melhor limpeza do óleo. Este processo deve ser repetido algumas vezes nestas 2 velocidades até que a placa fique um pouco mais limpa do óleo bruto. Em seguida deve-se aumentar a rotação para 130 rpm e mais uma vez lavar com Tetracloroetileno vagorosamente para que não afete os anéis formados pelas partículas. Finalmente, depois de um minuto girando a 130 rpm deve-se aumentar a velocidade para 200 rpm, em seguida a amostra da lâmina estará pronta. Agora deve-se deixá-la secar por algum tempo para que o Tetracloroetileno evapore e fique somente as partículas na lâmina.

Posteriormente a todo o processo de limpeza e secagem, retira-se a lâmina que está presa por pressão na ventosa de borracha do RPD com o auxílio de uma pinça.

Agora as lâminas das amostras estão prontas para inspeção no microscópio ou ferroscópio. Estas lâminas de vidro são chamadas de ferrogramas, a seguir na figura 52 temos a imagens de algumas das 60 lâminas confeccionadas no RPD.

Figura 52: Imagens de alguns Rpd's



Fonte: Próprio autor

PQA

O analisador de partículas utilizado foi o PQA cujas especificações estão na tabela 7 a seguir e sua imagem na figura 24 do capítulo II.

Tabela 7: Especificações do analisador quantitativo de partículas

Fabricante	Kittiwake Developments Ltd
Voltagem nominal	110/240V
Frequência	47 a 63 Hz
Consumo	15 watts
Diâmetro Máximo da Amostra	53 mm
Temperatura Ambiente	20°C - 30°C

Fonte: (KIMURA, 2009)

Esse equipamento é um magnetômetro com duas bobinas organizadas, de forma que a bobina de amostra (sensor) e a bobina de referência estão em equilíbrio quando não há nenhuma amostra no sensor. O sistema é projetado para assegurar cuidadosamente que ambas as bobinas respondem igualmente às mudanças na temperatura do ambiente. Quando uma amostra de óleo que contém partículas ferromagnéticas é colocada no sensor (bobina de amostra), o equilíbrio entre as bobinas é alterado. O sinal resultante causado pelo desequilíbrio é ampliado, filtrado e exibido na forma denominada de "índice" PQ, isto está relacionado diretamente à massa das partículas ferromagnéticas da amostra.

Para a realização dos testes de PQA foram coletadas amostras de 2 ml dos testes através de uma pipeta e colocadas em um recipiente plástico, conforme visto na figura 53 a seguir. Estes recipientes foram fechados, com tampas e colocados no aparelho para medição.

Figura 53: amostras para análise em PQA



Fonte: Próprio autor

Espectrômetro de Raio-X

O espectrômetro de Raio-X é um aparelho que utiliza a refração de ondas energéticas de raio-X. Com esse método é possível obter a quantificação e composição dos elementos presentes na amostra. As amostras para realização da espectrometria são separadas em recipientes contendo 12 ml de óleo. Estes recipientes que são vistos na figura 54 a seguir, são feitos de cilindros de alumínio, onde debaixo do mesmo é colocado um filme específico da XRF, para que os raios-X consigam penetrar na amostra sem nenhuma interferência.

Figura 54: Amostras preparadas.



Fonte: MURILO

O aparelho utilizado foi o Espectrômetro de Raio-X da marca "Oxford" modelo "X-Supreme" que pode ser visto na figura 55 a seguir. As amostras são colocadas nos espaços reservados do aparelho indicados pela seta amarela, de modo em que possa fazer todas as medições sem ter a necessidade de abrir a tampa.

Figura 55 Oxford modelo X-Supreme



Fonte: Próprio autor

4 RESULTADOS:

Os ensaios de desgastes foram realizados seguindo todos os procedimentos especificados no trabalho, de forma igual para todos os óleos. A seguir nas tabelas 7 a 11 temos as perdas de massa dos cilindros e as variações de temperaturas dos óleos antes e após cada ensaio.

Tabela 7: Ensaio com óleo de soja

Tipo de (Bio)Lubrificante	Tipo de Aditivo	Aditivo (%)	Denominação da amostra	Peso Inicial (g)	Peso Final (g)	Temp. Inicial (°C)	Temp. Final (°C)	Perda de massa (g)	
Soja (A)	Propil Galato (A)	0 (A)	AAA	46,71	46,41	25	54	0,30	
		2.5 (B)	AAB	45,81	45,66	25	55	0,15	
		5 (C)	AAC	45,66	45,49	25	57	0,17	
	Ácido Bórico (B)	0 (A)	ABA=AAA	46,71	46,41	25	54	0,30	
		2.5(B)	ABB	45,29	45,00	23	55	0,29	
		5 (C)	ABC	45,00	44,90	22	50	0,10	
	Molykote (C)	0 (A)	ACA=AAA	46,71	46,41	25	54	0,30	
		2.5(B)	ACB	46,32	46,02	23	55	0,30	
		5 (C)	ACC	46,02	45,62	22	52	0,40	
	Aditivo de origem vegetal (D)	0 (A)	ADA=AAA	46,71	46,41	25	54	0,30	
		2.5 (B)	ADB	43,93	43,62	23	52	0,31	
		5 (C)	ADC	43,62	43,28	23	54	0,34	
	Combinado (A) + (B) + (C) + (D) = (E)	0 (A)	$(A)+2.5(B)+2.5(C)+2.5(D)=$ (A)	AEA	41,76	41,41	28	53	0,35
		2.5 (B)	$(A)+0(B)+2.5(C)+2.5(D) =$ (B)	AEB	42,80	42,62	26	51	0,18
		2.5 (C)	$(A)+2.5(B)+0(C)+2.5(D) =$ (C)	AEC	39,96	39,80	27	53	0,16

Fonte: Próprio autor

Tabela 8: Ensaio com óleo de canola

Tipo de (Bio)Lubrificante	Tipo de Aditivo	Aditivo (%)	Denominação da amostra	Peso Inicial (g)	Peso Final (g)	Temp. Inicial (°C)	Temp. Final (°C)	Perda de massa (g)
Canola (B)	Propil Galato (A)	0 (A)	BAA	40,45	40,17	25	52	0,28
		2.5 (B)	BAB	40,53	40,38	26	53	0,15
		5 (C)	BAC	40,65	40,53	27	50	0,12
	Ácido Bórico (B)	0 (A)	BBA=BAA	40,45	40,17	25	52	0,28
		2.5(B)	BBB	41,85	41,41	21	50	0,44
		5 (C)	BBC	41,41	41,35	21	48	0,06
	Molykote (C)	0 (A)	BCA=BAA	40,45	40,17	25	52	0,28
		2.5(B)	BCB	38,00	37,65	22	52	0,35
		5 (C)	BCC	37,65	37,53	23	52	0,12
	Aditivo de origem vegetal (D)	0 (A)	BDA=BAA	40,45	40,17	25	52	0,28
		2.5 (B)	BDB	43,57	43,35	20	50	0,22
		5 (C)	BDC	43,35	43,30	20	51	0,05
	Combinado (A) + (B) + (C) + (D) = (E)	0 (A)+2.5(B)+2.5(C)+2.5(D)= (A)	BEA	43,57	43,48	21	45	0,09
		2.5 (A)+0(B)+2.5(C)+2.5(D) = (B)	BEB	44,21	44,14	22	47	0,07
		2.5 (A)+2.5(B)+0(C)+2.5(D) = (C)	BEC	41,76	41,70	22	50	0,06

Fonte: Próprio autor

Tabela 9: Ensaio com óleo de milho

Tipo de (Bio)Lubrificante	Tipo de Aditivo	Aditivo (%)	Denominação da amostra	Peso Inicial (g)	Peso Final (g)	Temp. Inicial (°C)	Temp. Final (°C)	Perda de massa (g)
Milho (C)	Propil Galato (A)	0 (A)	CAA	41,58	41,18	26	52	0,4
		2.5 (B)	CAB	40,04	39,67	26	57	0,37
		5 (C)	CAC	39,67	39,21	26	58	0,46
	Ácido Bórico (B)	0 (A)	CBA=CAA	41,58	41,18	26	52	0,4
		2.5(B)	CBB	37,97	37,49	27	52	0,48
		5 (C)	CBC	37,49	37,03	27	54	0,46
	Molykote (C)	0 (A)	CCA=CAA	41,58	41,18	26	52	0,4
		2.5(B)	CCB	38,56	38,33	28	51	0,23
		5 (C)	CCC	38,33	38,01	28	54	0,32
	Aditivo de origem vegetal (D)	0 (A)	CDA=CAA	41,58	41,18	26	52	0,4
		2.5 (B)	CDB	38,07	37,48	27	52	0,59
		5 (C)	CDC	37,48	36,96	28	55	0,52
	Combinado (A) + (B) + (C) + (D) = (E)	0 (A)+2.5(B)+2.5(C)+2.5(D)= (A)	CEA	40,1	39,85	27	57	0,25
		2.5 (A)+0(B)+2.5(C)+2.5(D) = (B)	CEB	39,85	39,61	26	54	0,24
		2.5 (A)+2.5(B)+0(C)+2.5(D) = (C)	CEC	41,16	40,96	24	51	0,2

Fonte: Próprio autor

Tabela 10: Ensaio com óleo de girassol

Tipo de (Bio)Lubrificante	Tipo de Aditivo	Aditivo (%)	Denominação da amostra	Peso Inicial (g)	Peso Final (g)	Temp. Inicial (°C)	Temp. Final (°C)	Perda de massa (g)
Girassol (D)	Propil Galato (A)	0 (A)	DAA	45,40	45,22	23	48	0,18
		2.5 (B)	DAB	43,93	43,72	27	57	0,21
		5 (C)	DAC	43,72	43,47	26	54	0,25
	Ácido Bórico (B)	0 (A)	DBA=DAA	45,40	45,22	23	48	0,18
		2.5(B)	DBB	42,07	41,81	27	55	0,26
		5 (C)	DBC	41,81	41,60	27	53	0,21
	Molykote (C)	0 (A)	DCA=DAA	45,40	45,22	23	48	0,18
		2.5(B)	DCB	39,80	39,63	24	54	0,17
		5 (C)	DCC	39,63	39,50	25	57	0,13
	Aditivo de origem vegetal (D)	0 (A)	DDA=DAA	45,40	45,22	23	48	0,18
		2.5 (B)	DDB	43,98	43,81	28	51	0,17
		5 (C)	DDC	43,81	43,64	28	52	0,17
	Combinado (A) + (B) + (C) + (D) = (E)	0 (A)+2.5(B)+2.5(C)+2.5(D) = (A)	DEA	45,14	44,87	27	55	0,27
		2.5 (A)+0(B)+2.5(C)+2.5(D) = (B)	DEB	44,87	44,66	28	54	0,21
		2.5 (A)+2.5(B)+0(C)+2.5(D) = (C)	DEC	45,68	45,40	28	56	0,28

Fonte: Próprio autor

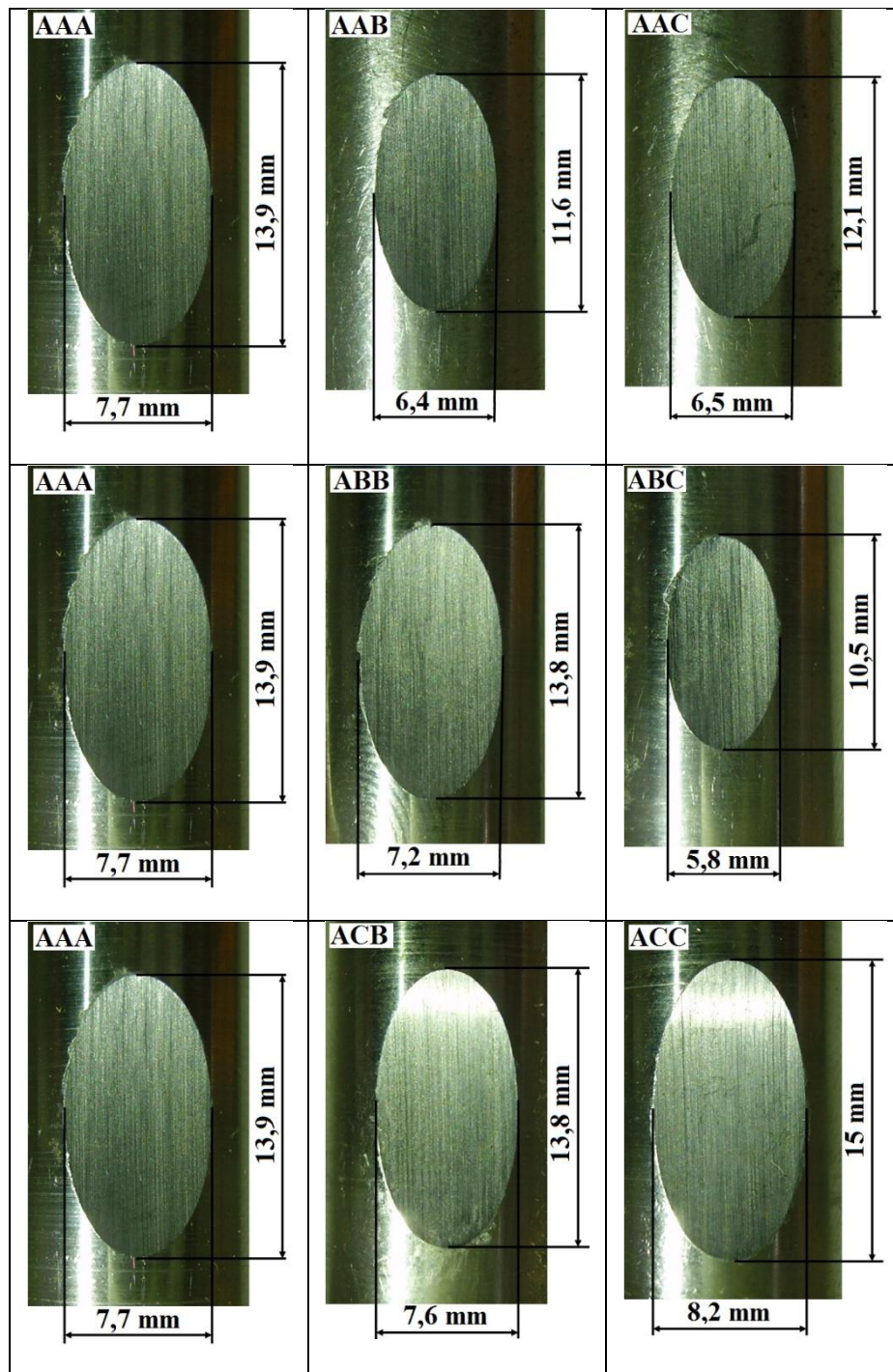
Tabela 11: Ensaio com óleo mineral

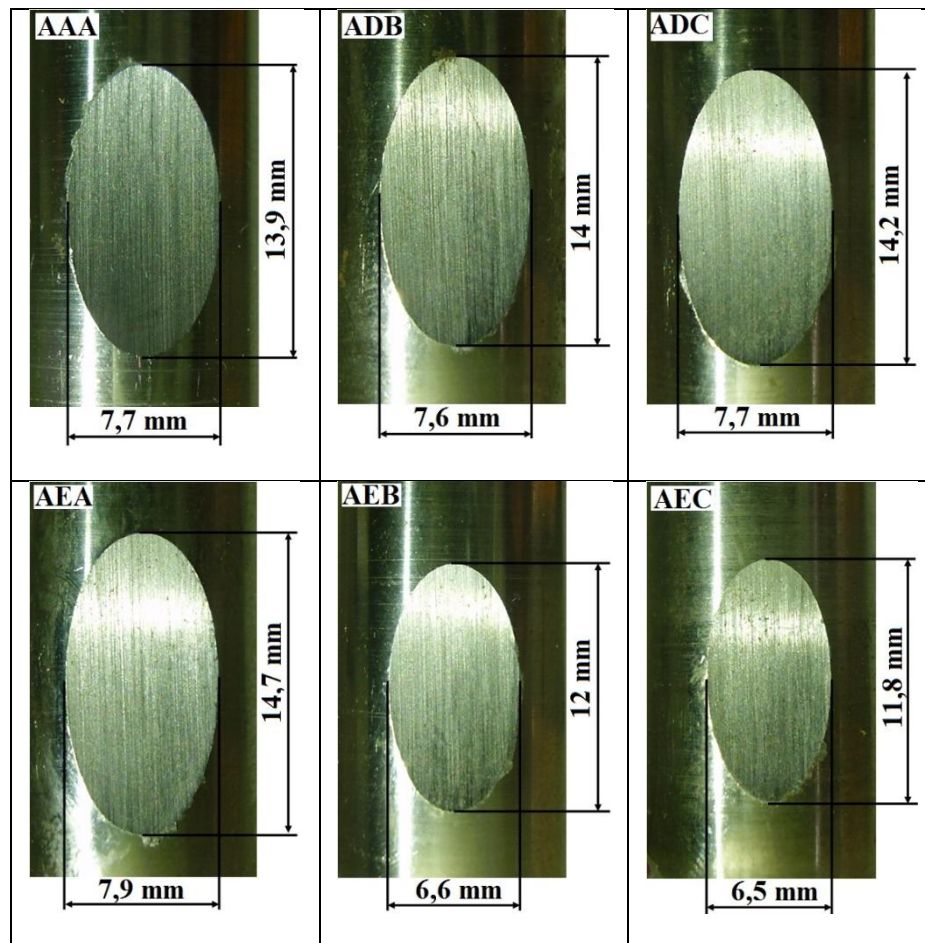
Tipo de (Bio)Lubrificante	Tipo de Aditivo	Aditivo (%)	Denominação da amostra	Peso Inicial (g)	Peso Final (g)	Temp. Inicial (°C)	Temp. Final (°C)	Perda de massa (g)
Mineral (E)	Propil Galato (A)	0 (A)	EAA	39,78	39,77	25	57	0,01
		2.5 (B)	EAB	37,9	37,86	27	60	0,04
		5 (C)	EAC	37,86	37,8	27	62	0,06
	Ácido Bórico (B)	0 (A)	EBA=EAA	39,78	39,77	25	57	0,01
		2.5(B)	EBB	36	35,98	26	57	0,02
		5 (C)	EBC	35,98	35,97	26	56	0,01
	Molykote (C)	0 (A)	ECA=EAA	39,78	39,77	25	57	0,01
		2.5(B)	ECB	38,79	38,77	25	55	0,02
		5 (C)	ECC	38,77	38,76	24	54	0,01
	Aditivo de origem vegetal (D)	0 (A)	EDA=EAA	39,78	39,77	25	57	0,01
		2.5 (B)	EDB	40,66	40,65	26	57	0,01
		5 (C)	EDC	40,65	40,64	23	53	0,01
	Combinado (A) + (B) + (C) + (D) = (E)	0 (A)+2.5(B)+2.5(C)+2.5(D) = (A)	EEA	37,34	37,33	28	57	0,01
		2.5 (A)+0(B)+2.5(C)+2.5(D) = (B)	EEB	37,33	37,28	25	57	0,05
		2.5 (A)+2.5(B)+0(C)+2.5(D) = (C)	EEC	37,79	37,75	25	58	0,04

Fonte: Próprio autor

As Tabelas 12 a 16 apresentam fotografias dos cilindros desgastados e suas respectivas medidas.

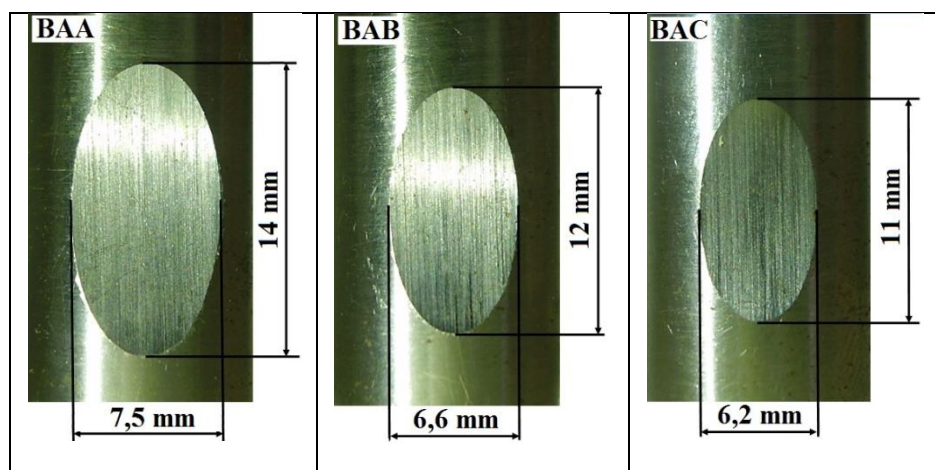
Tabela 12: Imagens dos cilindros desgastados com o óleo de soja

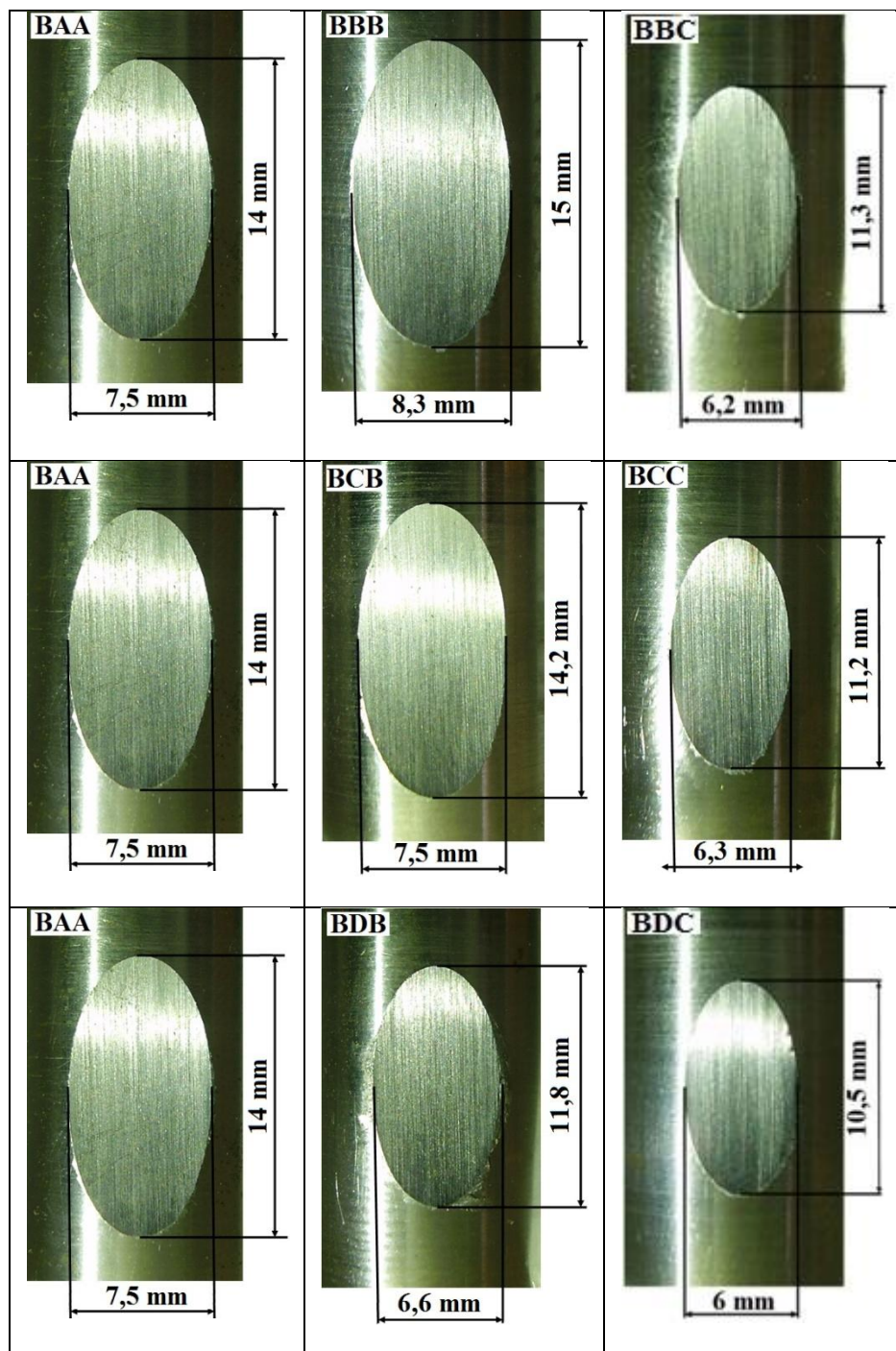


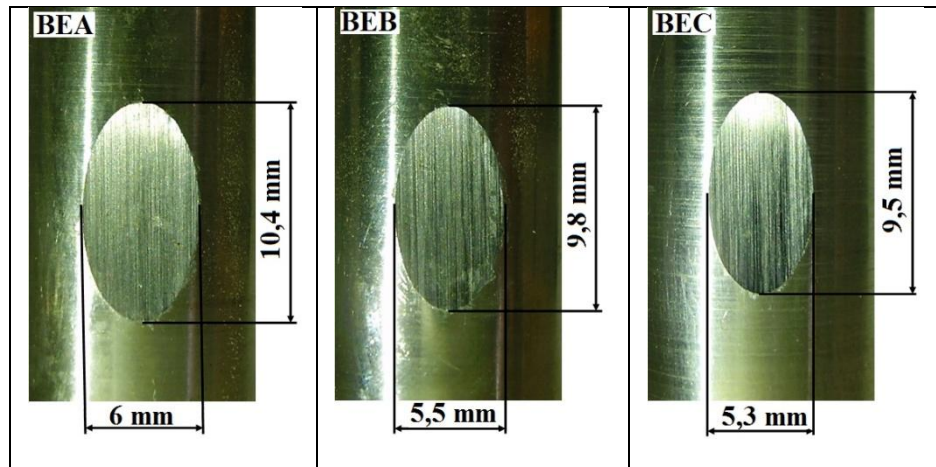


Fonte: Próprio autor

Tabela 13: Imagens dos cilindros desgastados com o óleo de canola

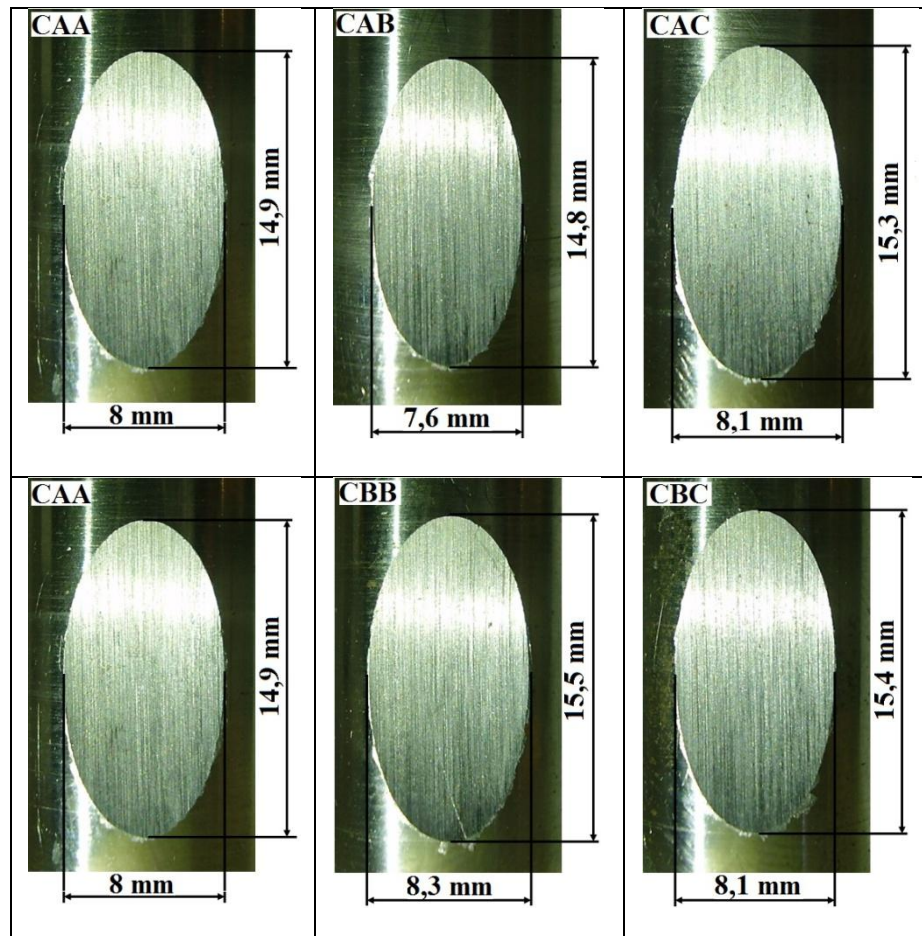


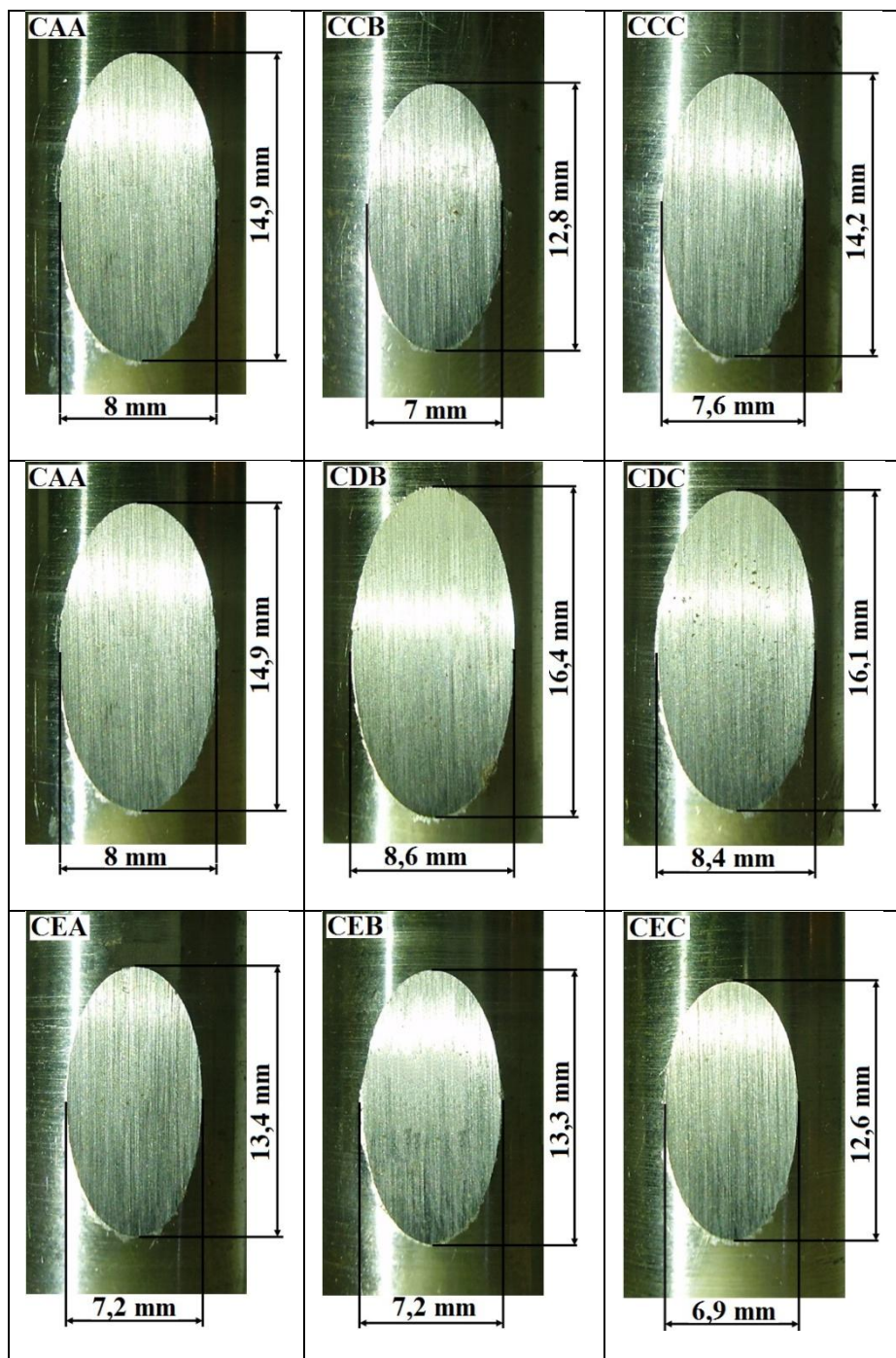




Fonte: Próprio autor

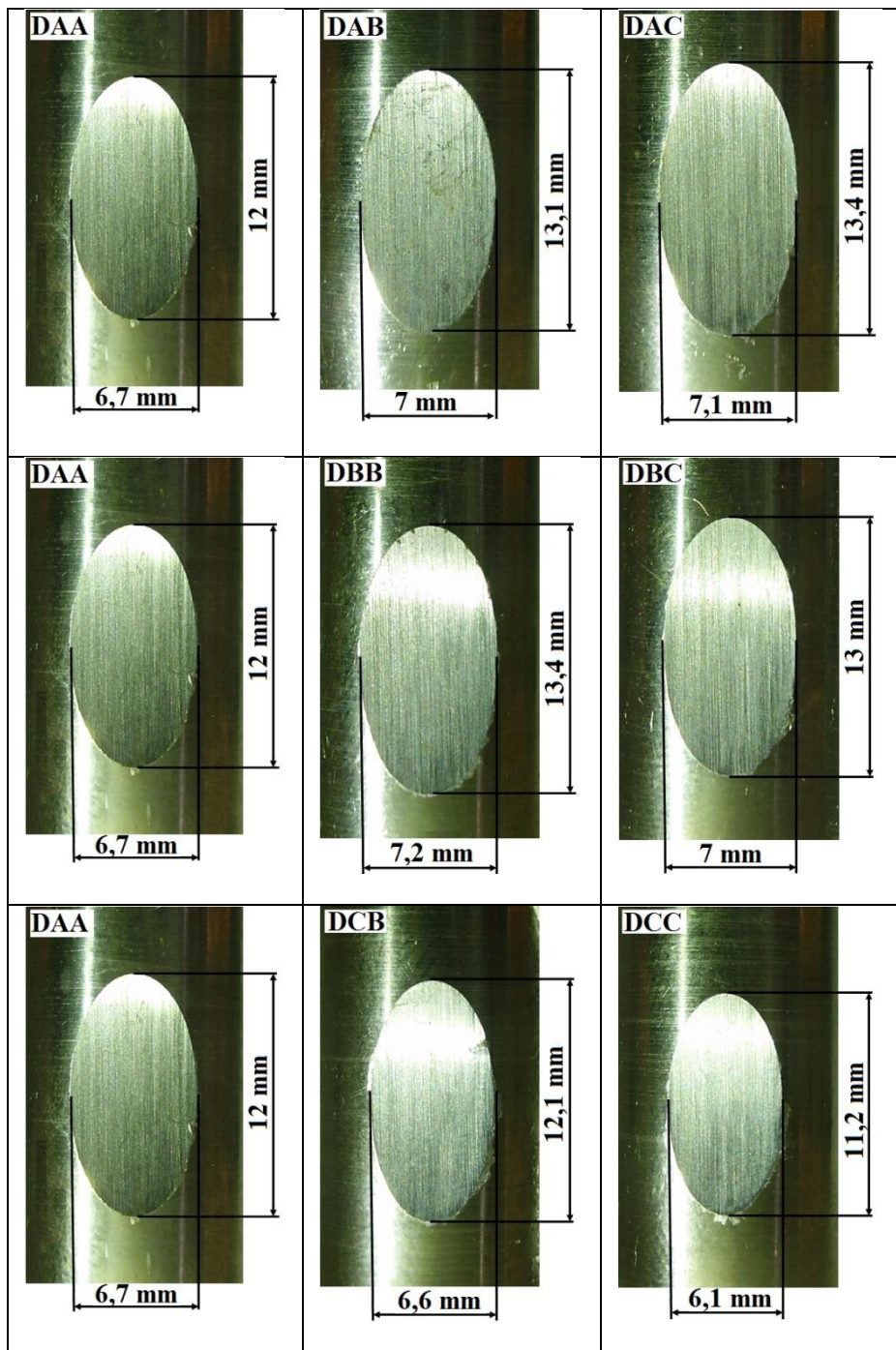
Tabela 14: Imagens dos cilindros desgastados com o óleo de milho

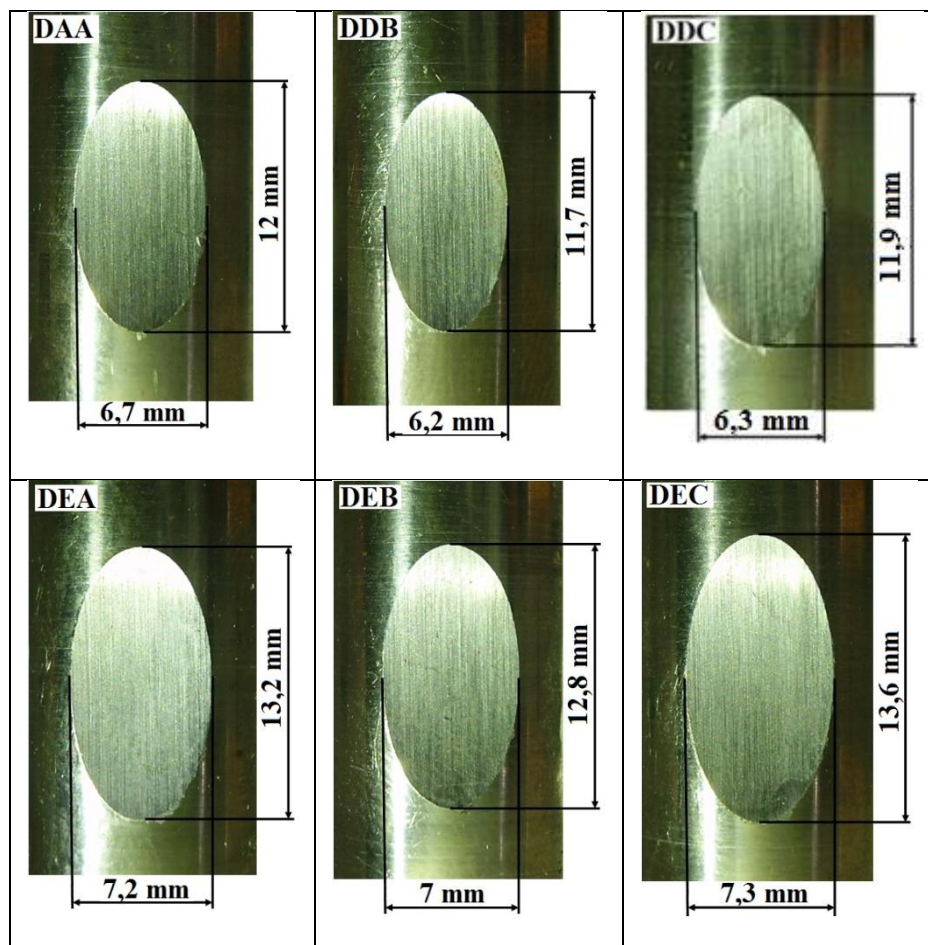




Fonte: Próprio autor

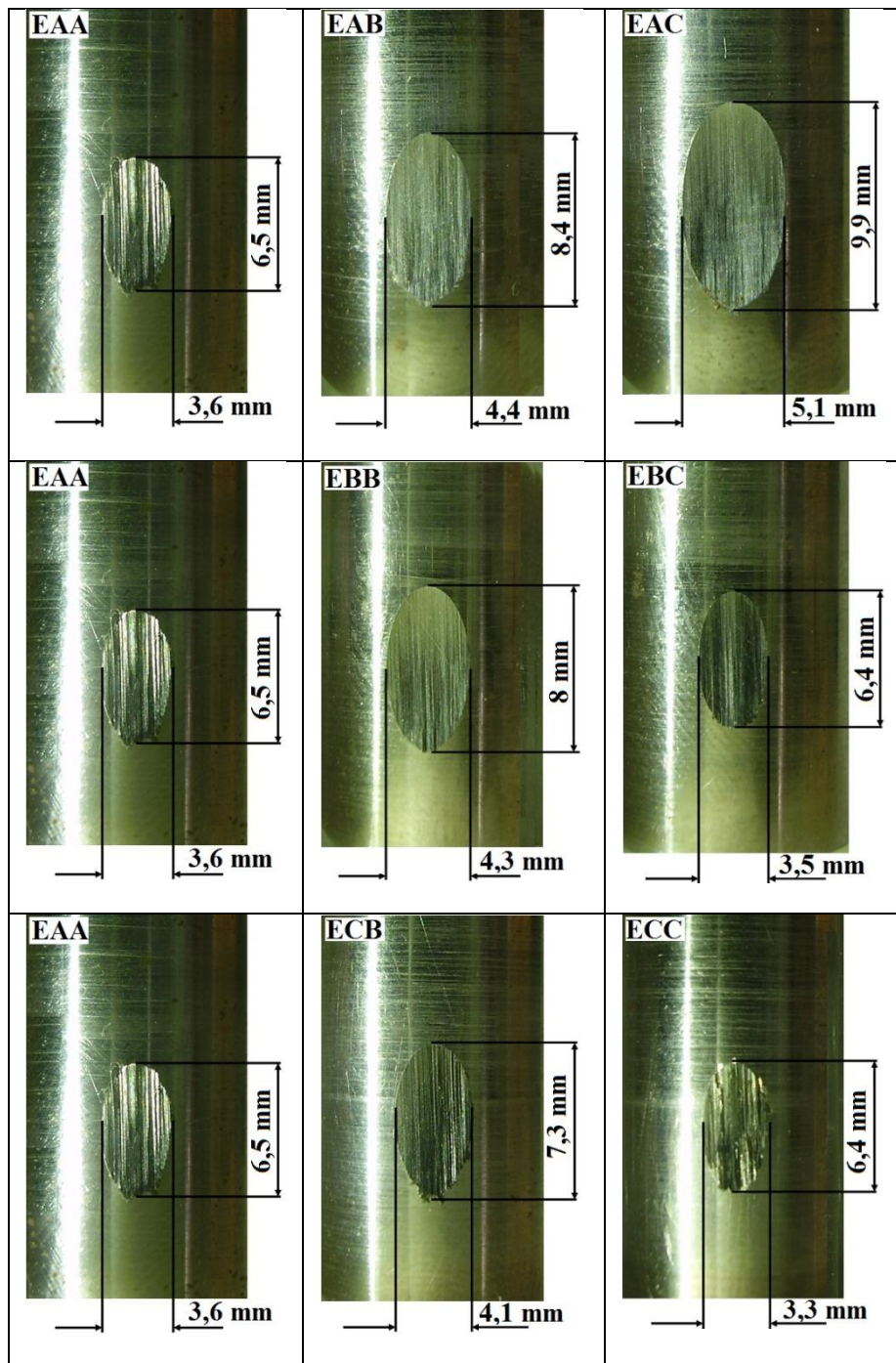
Tabela 15: Imagens dos cilindros desgastados com o óleo de girassol

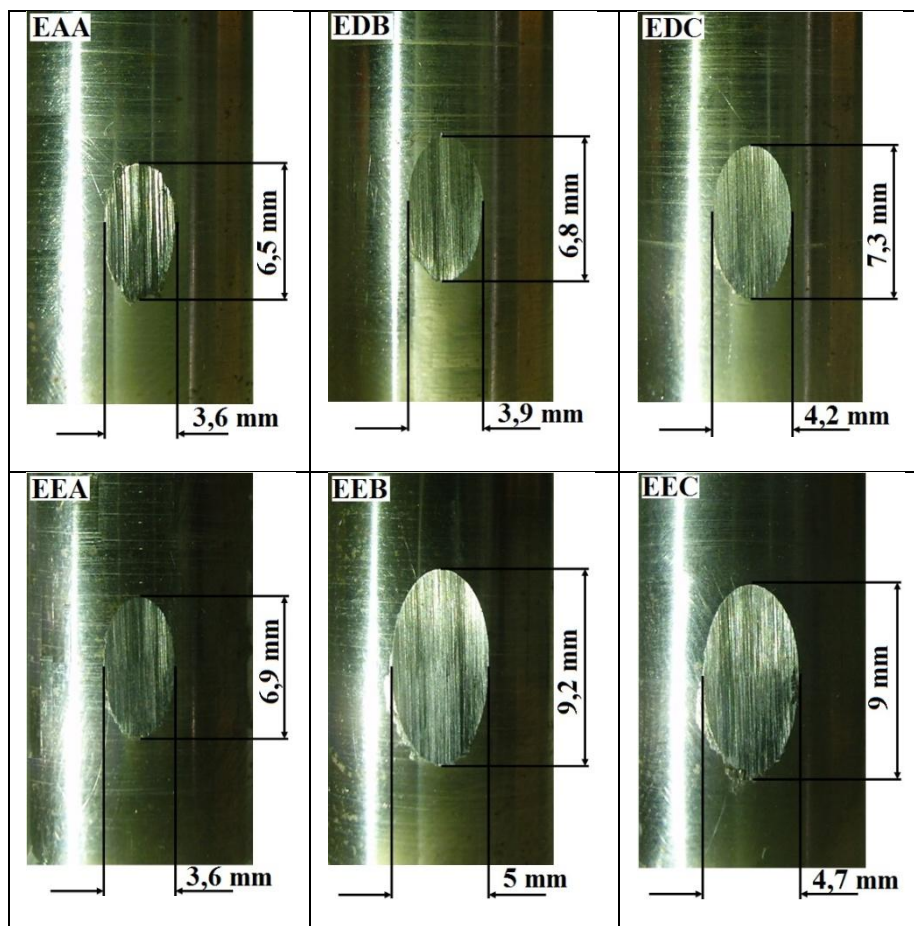




Fonte: Próprio autor

Tabela 16: Imagens dos cilindros desgastados com o óleo de mineral





Fonte: Próprio autor

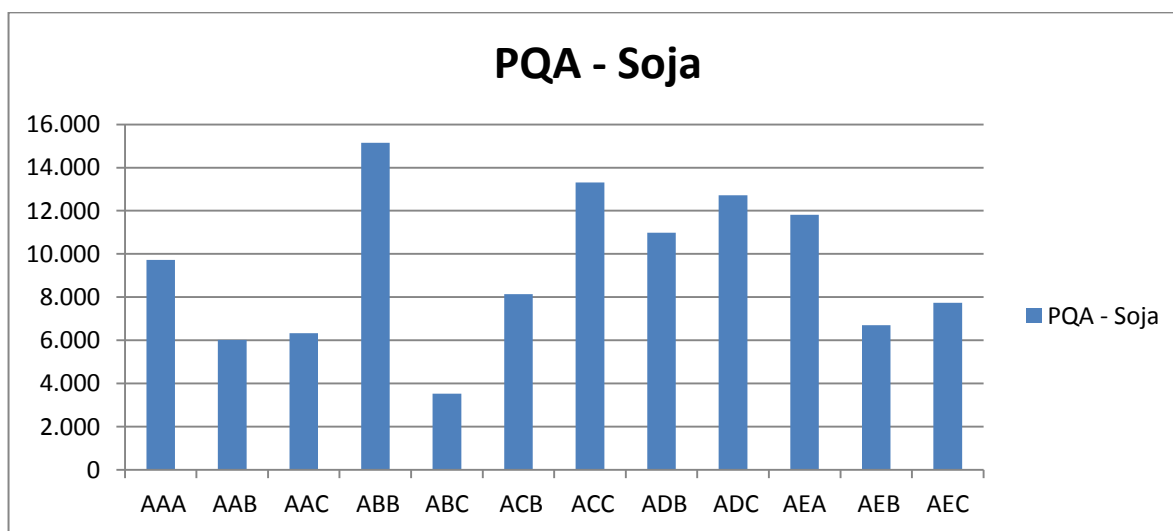
A seguir nas Tabelas 17 a 21 e nas Figuras 56 a 60, temos os valores referentes às análises de ferrografia direta, utilizando o analisador quantitativo de partículas (PQA).

Tabela 17: Índice PQ óleo de soja

Medição/ Amostra	1	2	3	Média
AAA	9.446	10.509	9.234	9.730
AAB	6.083	5.901	6.059	6.014
AAC	6.372	6.240	6.385	6.332
ABB	14.985	15.130	15.320	15.145
ABC	3.536	3.493	3.576	3.535
ACB	8.140	8.167	8.089	8.132
ACC	13.497	13.155	13.283	13.312
ADB	10.891	11.201	10.876	10.989
ADC	12.631	12.610	12.933	12.725
AEA	11.755	11.760	11.949	11.821
AEB	6.544	6.644	6.933	6.707
AEC	7.665	7.811	7.755	7.744

Fonte: Próprio autor

Figura 56 Gráfico do PQA do óleo de soja



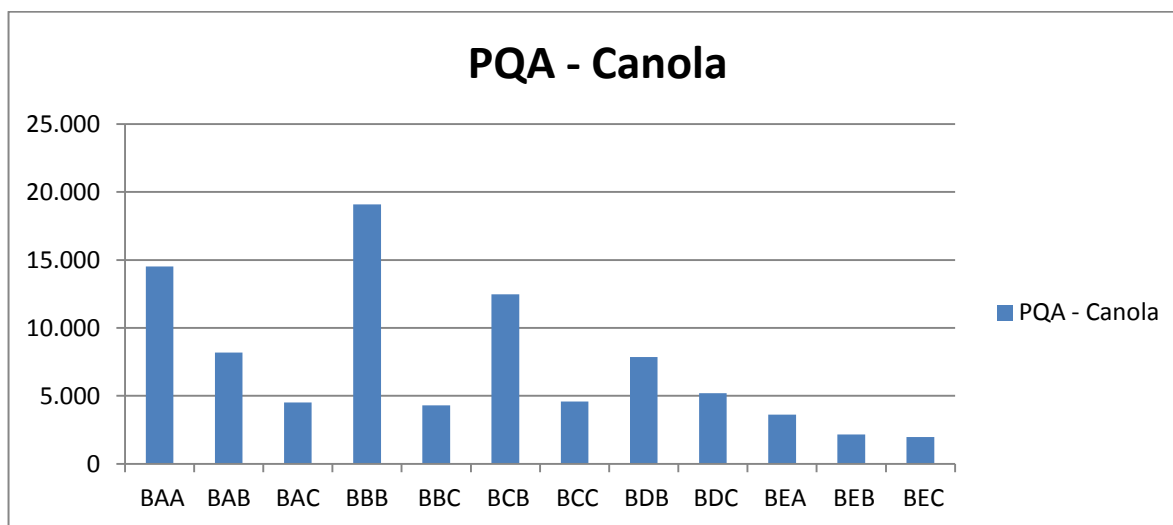
Fonte: Próprio autor

Tabela 18: Índice PQ óleo de canola

Medição/ Amostra	1	2	3	Média
BAA	14.721	15.147	13.659	14.509
BAB	8.136	8.701	7.724	8.187
BAC	4.715	4.517	4.338	4.523
BBB	19.965	20.041	17.224	19.077
BBC	4.348	4.261	4.312	4.307
BCB	13.887	11.496	12.032	12.472
BCC	4.758	4.563	4.464	4.595
BDB	7.742	7.993	7.809	7.848
BDC	5.154	5.331	5.128	5.204
BEA	3.627	3.557	3.673	3.619
BEB	2.228	2.126	2.150	2.168
BEC	2.040	1.955	1.921	1.972

Fonte: Próprio autor

Figura 57: Gráfico do PQA do óleo de canola



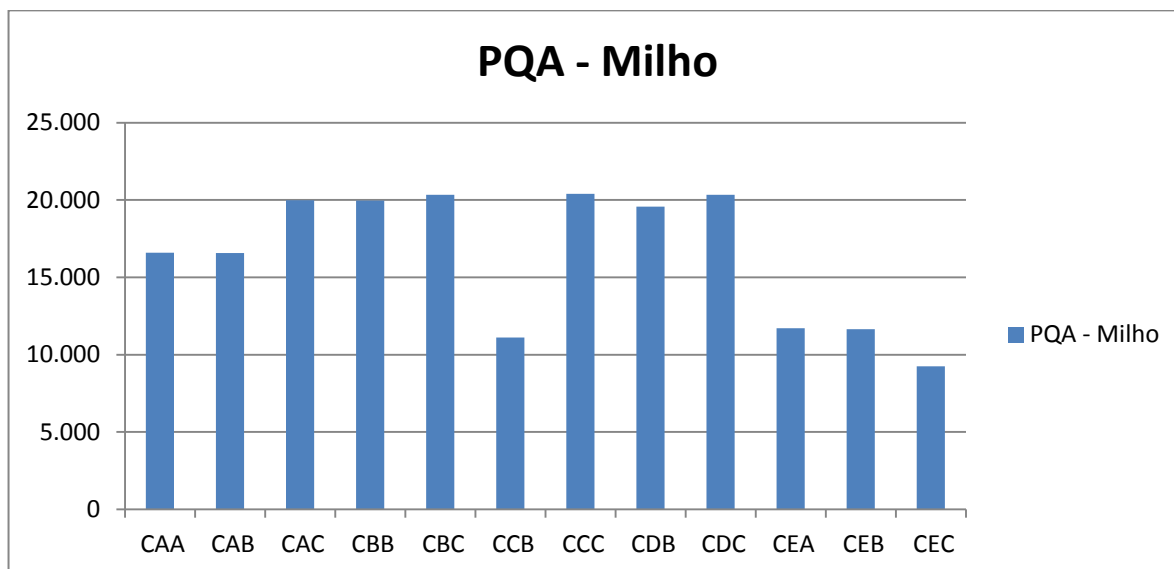
Fonte: Próprio autor

Tabela 19: Índice PQ óleo de milho

Medição/ Amostra	1	2	3	Média
CAA	17.934	15.252	16.593	16.593
CAB	16.911	17.296	15.508	16.572
CAC	20.108	20.233	19.629	19.990
CBB	19.316	20.288	20.284	19.963
CBC	20.468	20.286	20.284	20.346
CCB	11.286	10.452	11.614	11.117
CCC	20.469	20.469	20.281	20.406
CDB	20.465	19.566	18.685	19.572
CDC	20.459	20.290	20.270	20.340
CEA	11.343	11.265	12.537	11.715
CEB	11.295	12.208	11.407	11.637
CEC	8.633	9.635	9.472	9.247

Fonte: Próprio autor

Figura 58: Gráfico do PQA do óleo de milho



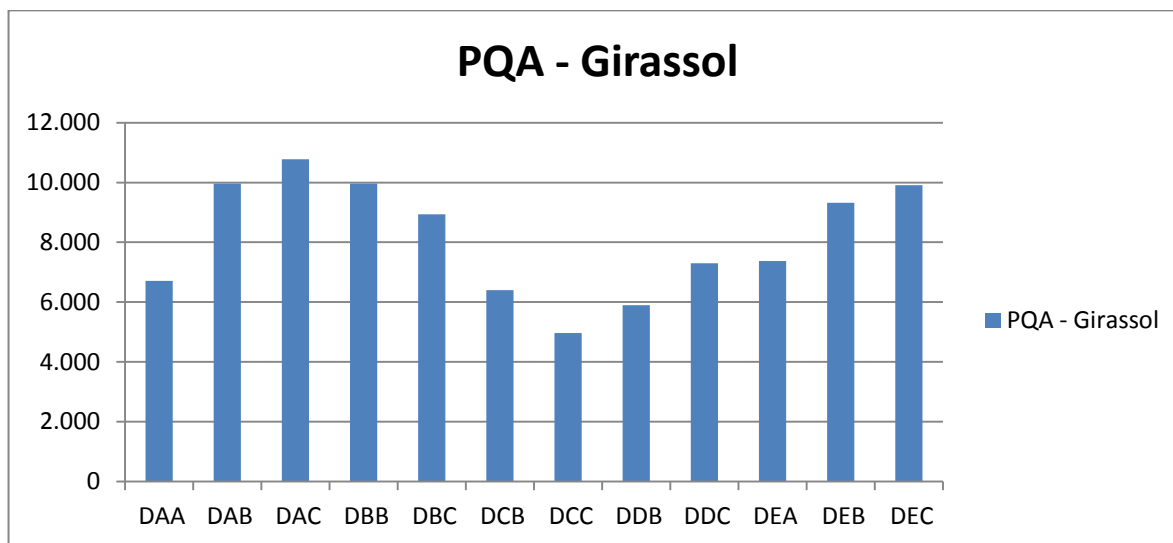
Fonte: Próprio autor

Tabela 20: Índice PQ óleo de girassol

Medição/ Amostra	1	2	3	Média
DAA	6.713	6.594	6.839	6.715
DAB	9.556	10.557	9.764	9.959
DAC	10.935	10.392	10.992	10.773
DBB	10.001	10.401	9.484	9.962
DBC	9.112	8.195	9.511	8.939
DCB	6.176	6.659	6.378	6.404
DCC	4.972	4.812	5.108	4.964
DDB	5.492	5.902	6.287	5.894
DDC	7.029	7.462	7.418	7.303
DEA	6.774	8.463	6.893	7.377
DEB	9.103	9.880	8.969	9.317
DEC	9.211	10.876	9.632	9.906

Fonte: Próprio autor

Figura 59: Gráfico do PQA do óleo de girassol



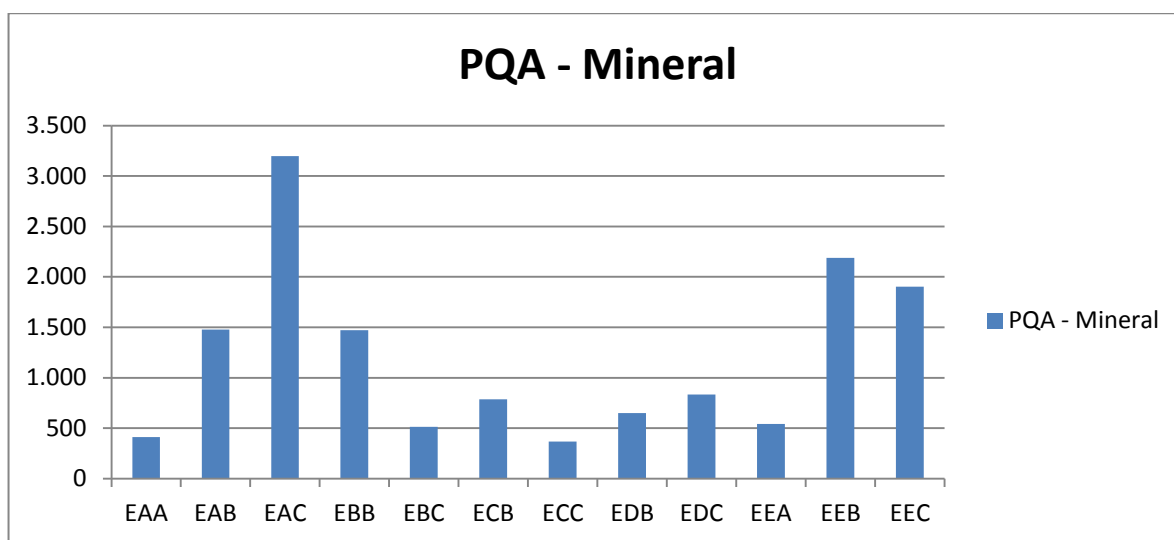
Fonte: Próprio autor

Tabela 21: Índice PQ óleo mineral

Medição/ Amostra	1	2	3	Média
EAA	436	382	418	412
EAB	1.439	1.497	1.500	1.479
EAC	3.172	3.314	3.106	3.197
EBB	1.474	1.488	1.452	1.471
EBC	509	517	511	512
ECB	740	785	831	785
ECC	369	365	367	367
EDB	655	645	649	650
EDC	844	779	879	834
EEA	537	530	555	541
EEB	2.246	2.148	2.168	2.187
EEC	1.869	1.934	1.901	1.901

Fonte: Próprio autor

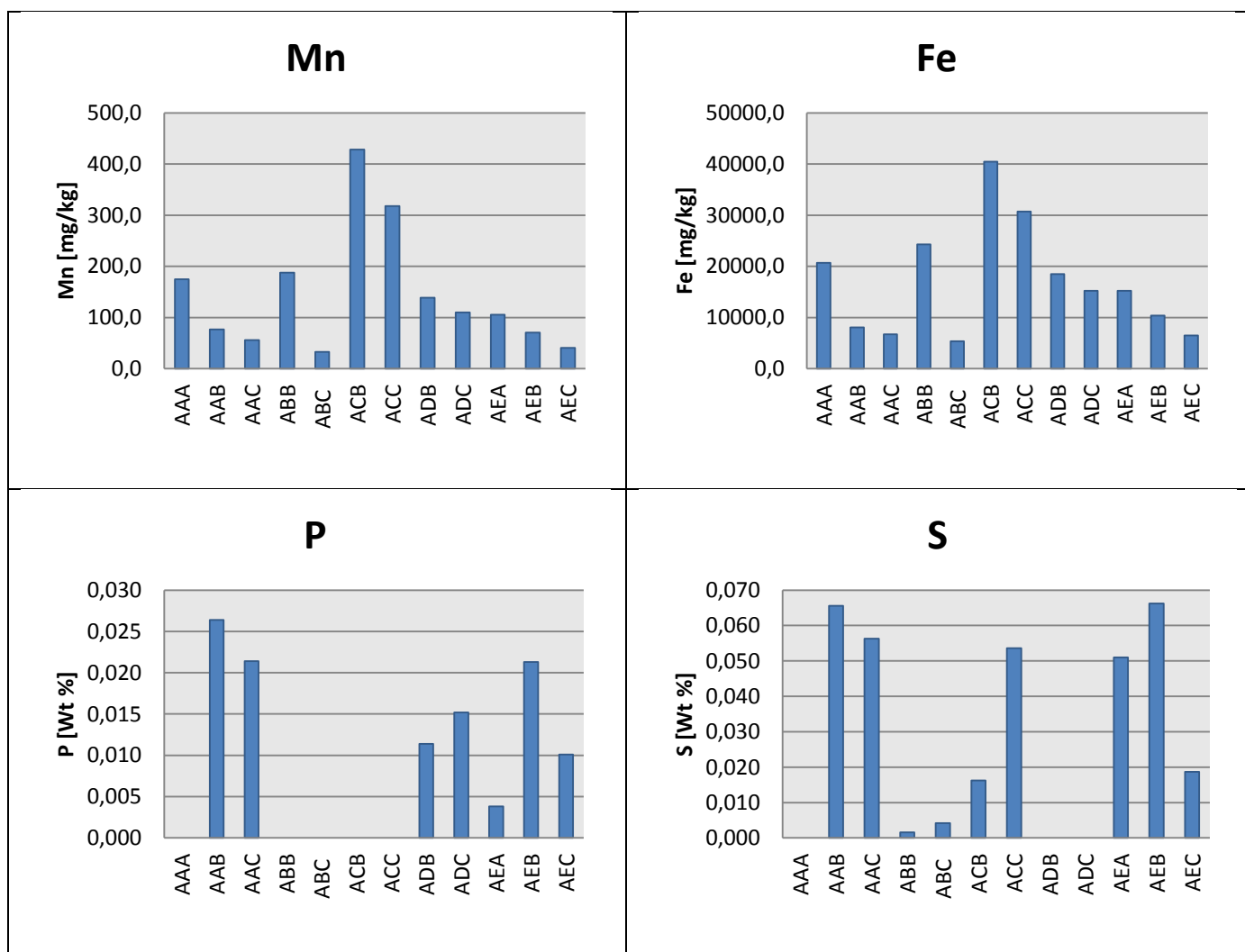
Figura 60: Gráfico do PQA do óleo mineral



Fonte: Próprio autor

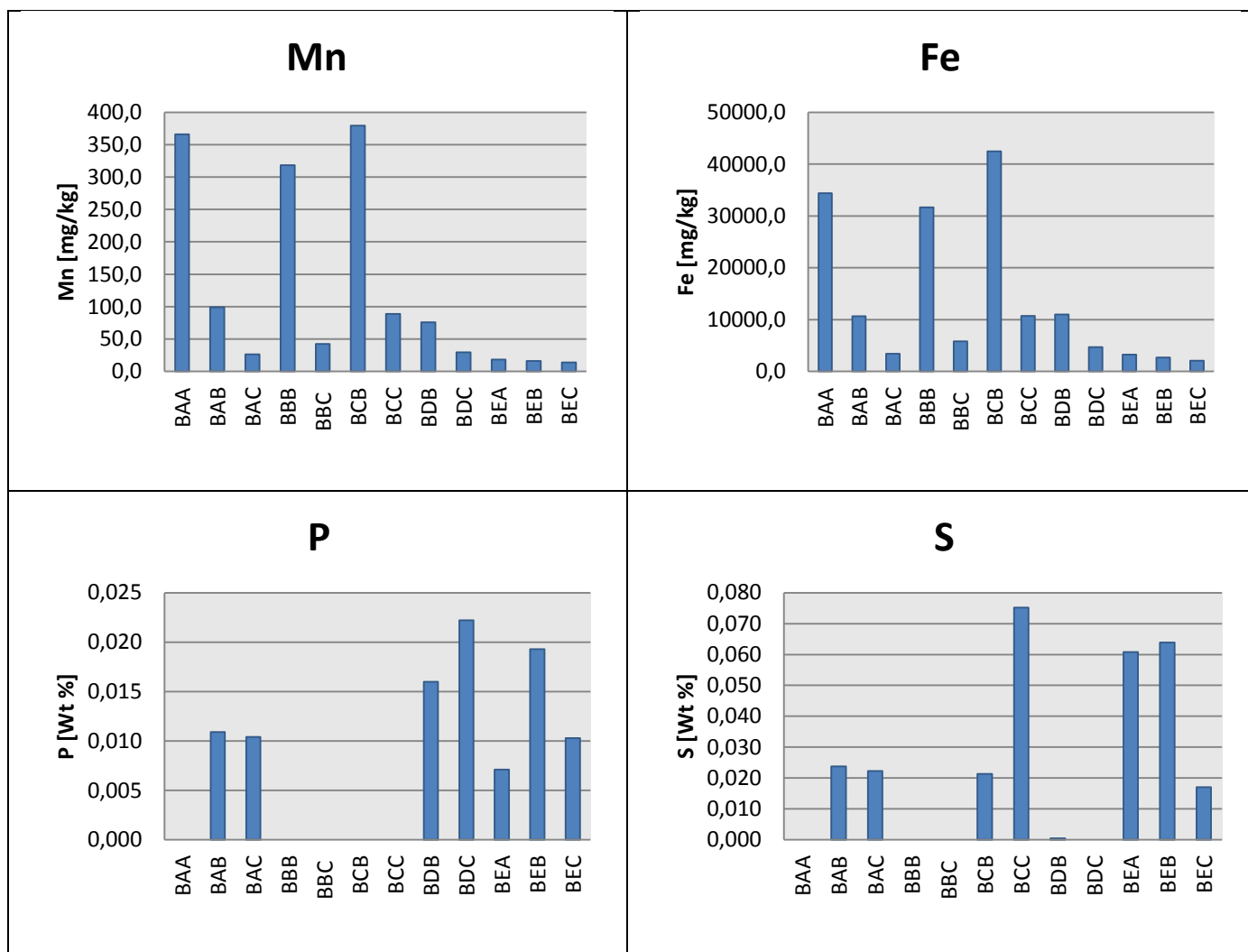
A seguir, nas Figuras 61 a 65 temos os valores referentes aos testes de Espectrometria de Raio X.

Figura 61: Espectrometria do Óleo de Soja



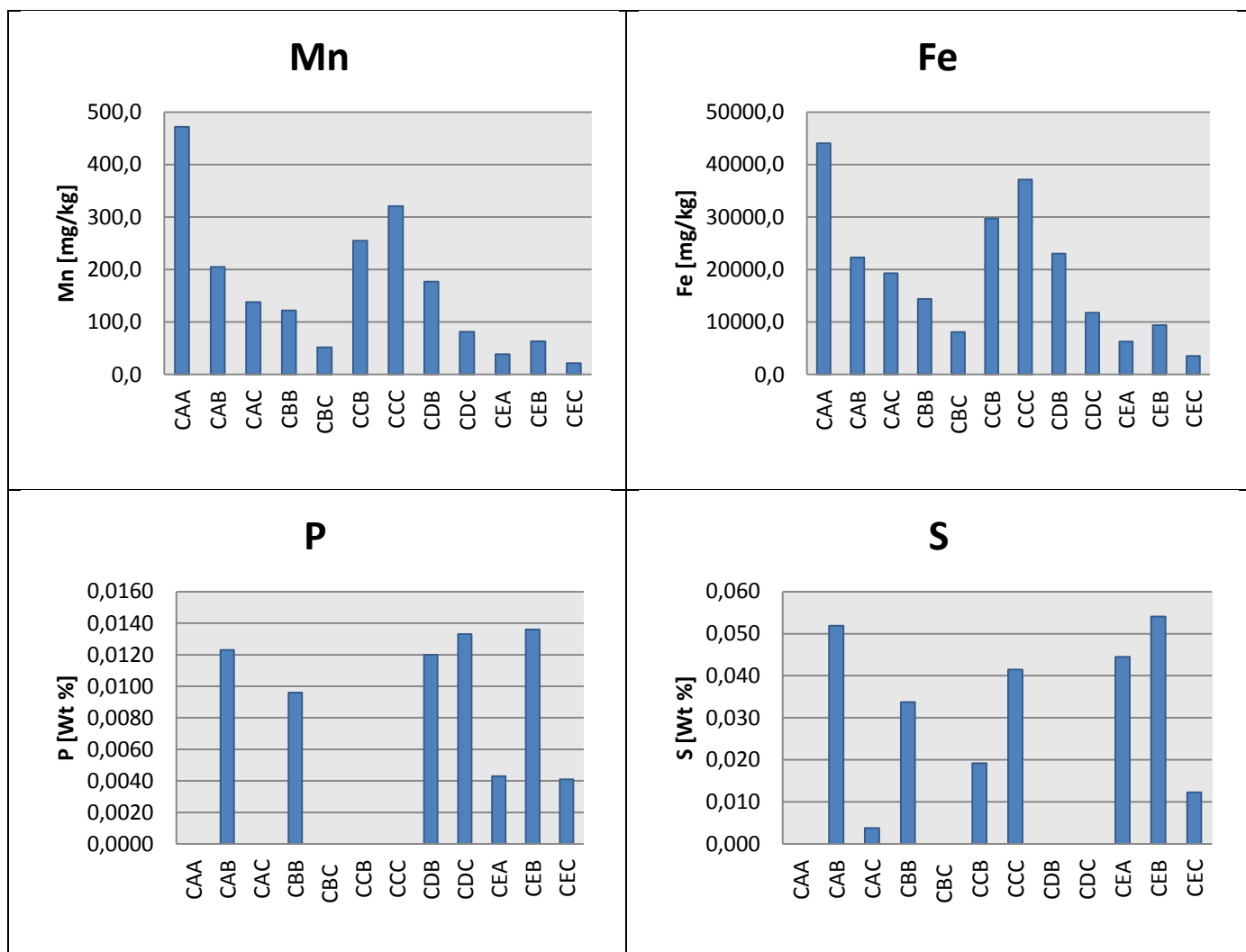
Fonte: Próprio autor

Figura 62: espectrometria do Óleo de Canola



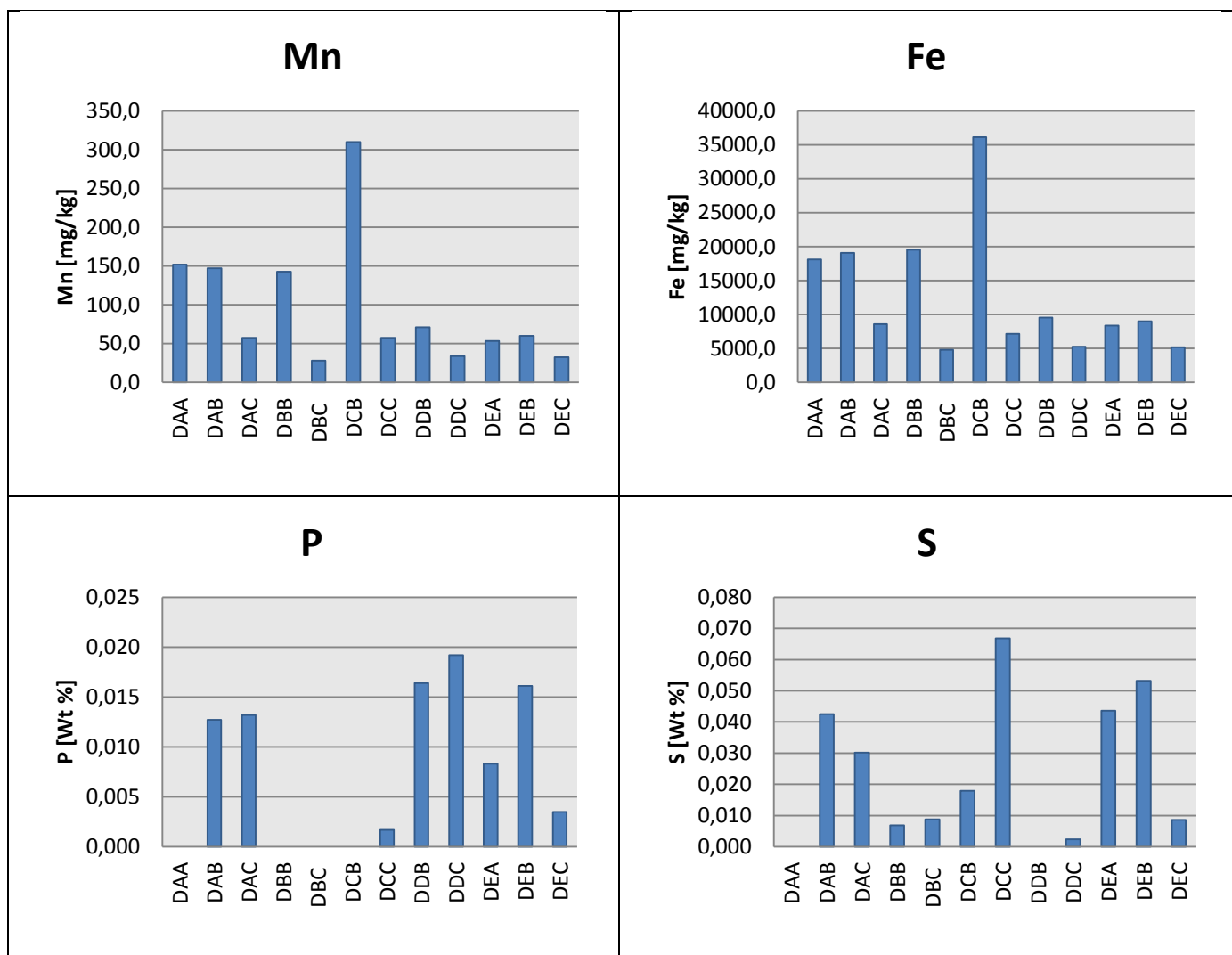
Fonte: Próprio autor

Figura 63: Espectrometria do Óleo de Milho



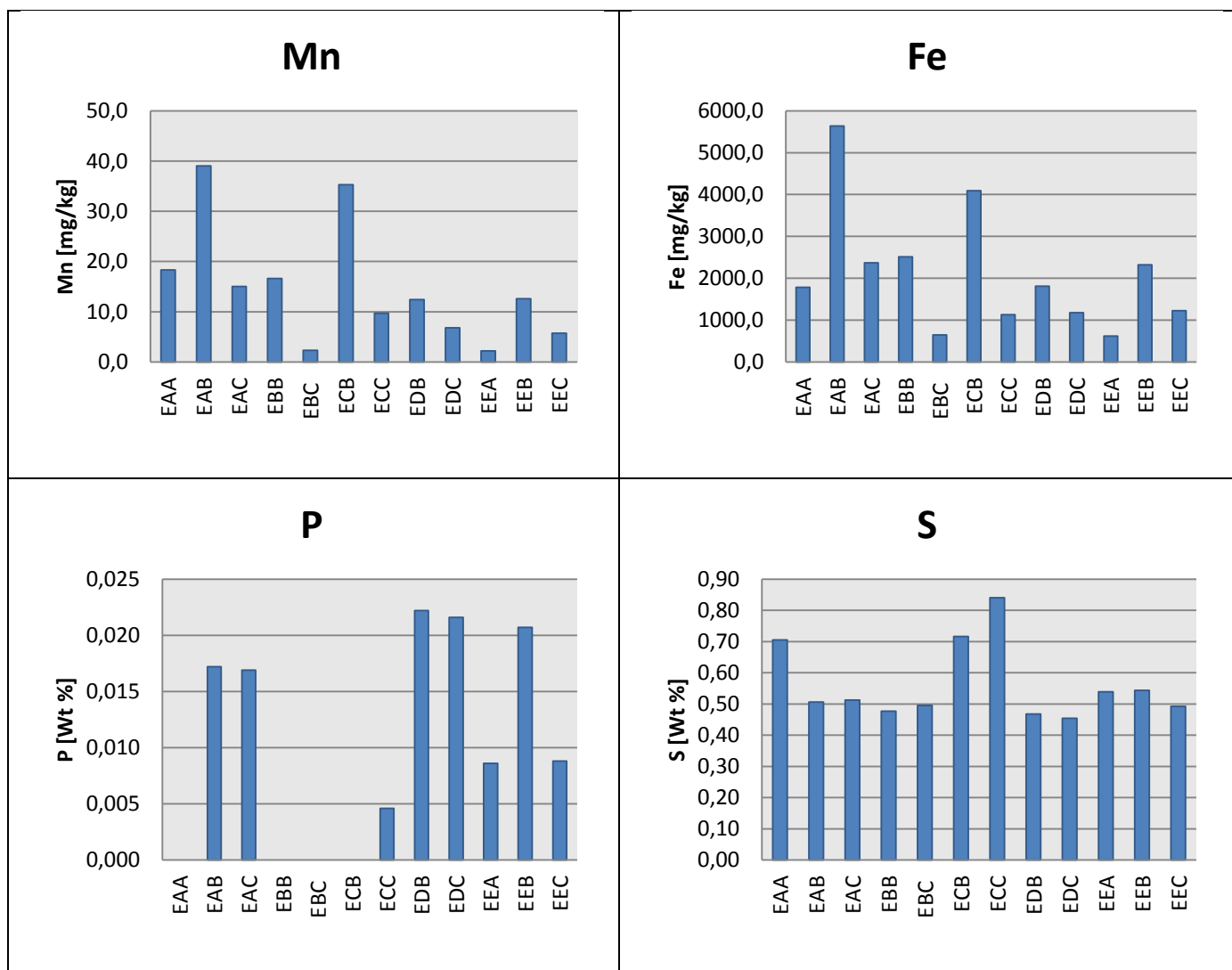
Fonte: Próprio autor

Figura 64: Espectrometria do Óleo de Girassol



Fonte: Próprio autor

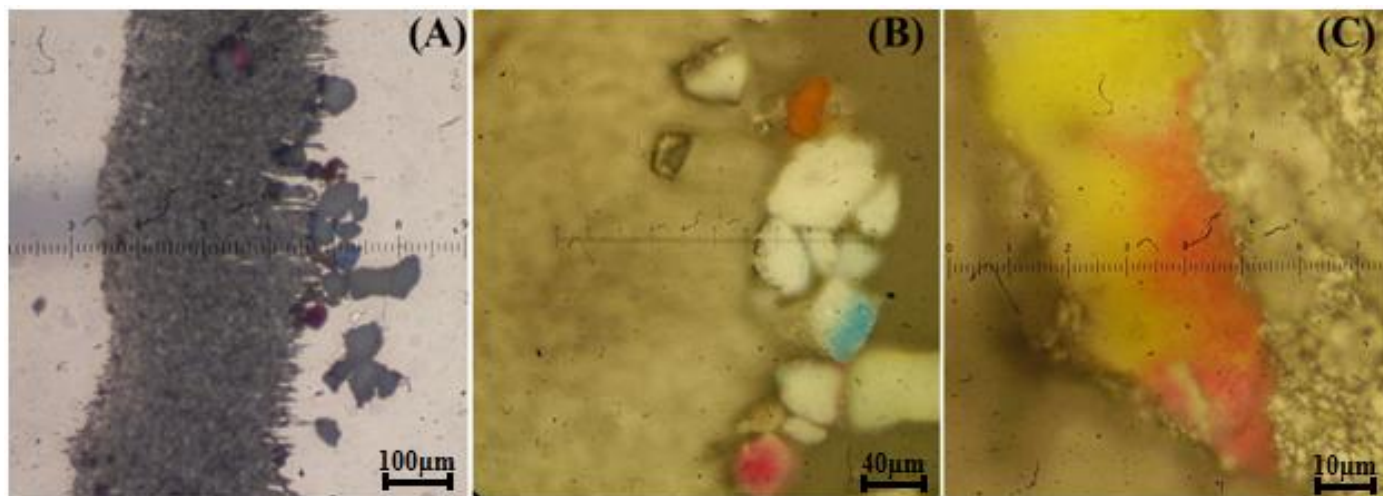
Figura 65: Espectrometria do Óleo Mineral



Fonte: Próprio autor

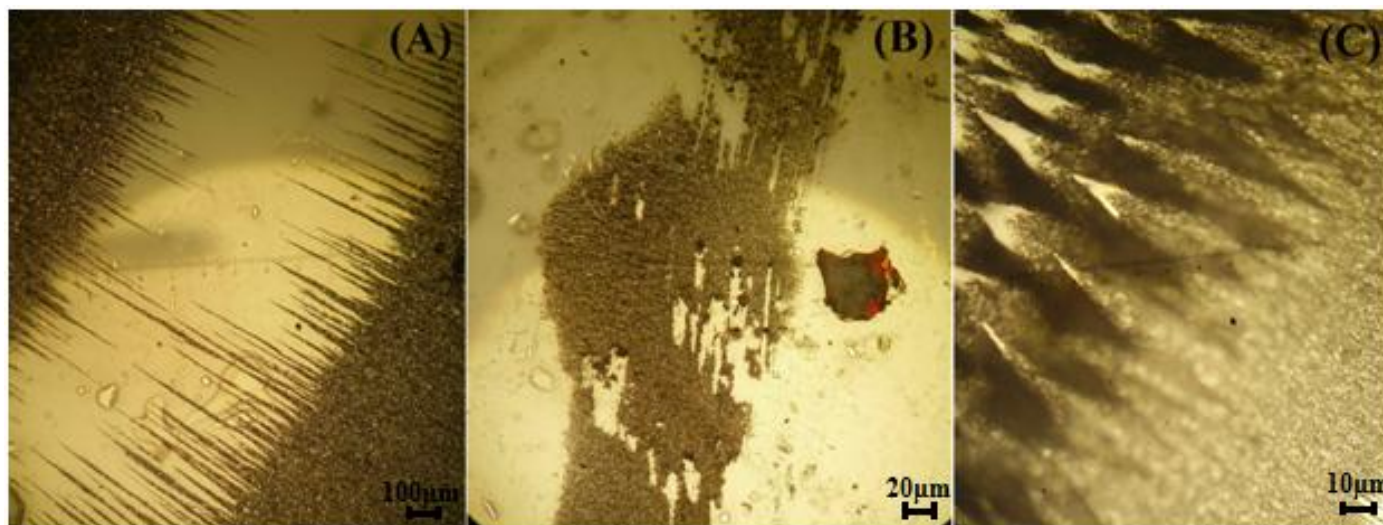
Após terem sido confeccionadas as lâminas no aparelho RPD, as mesmas puderam ser observadas e fotografadas no Ferrosκόpio. As figuras 66 a 70 apresentam algumas lâminas de RPD de cada óleo utilizado.

Figura 66: RPD da amostra do óleo de soja puro, (A) aumento de 100 vezes, (B) aumento de 500 vezes, (C) aumento de 1000 vezes.



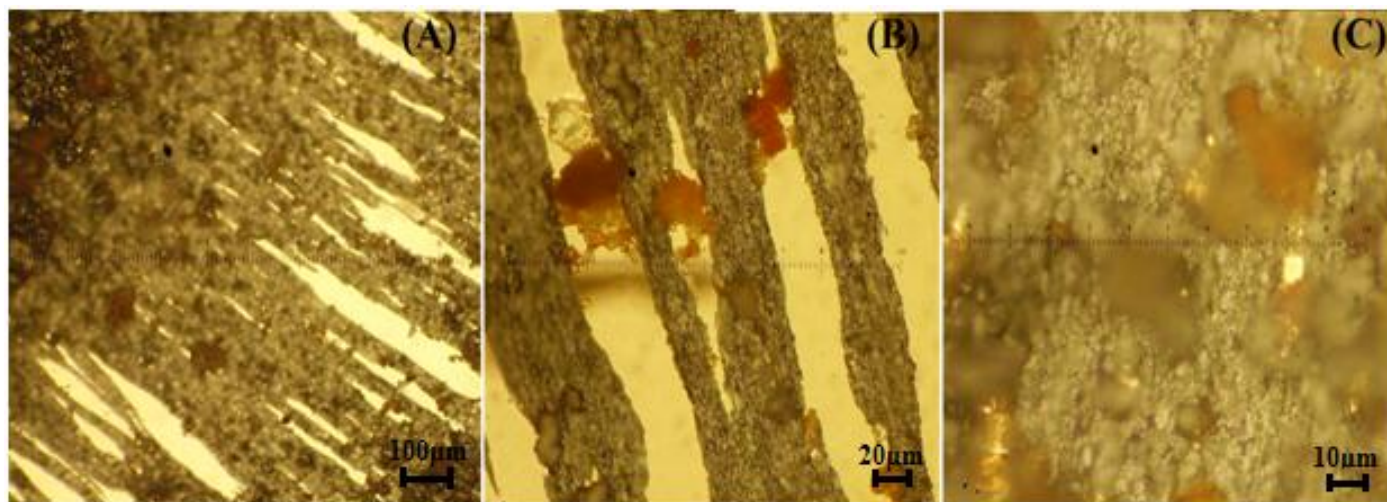
Fonte: Próprio autor

Figura 67: RPD da amostra do óleo de canola com 2,5% de molykote, (A) aumento de 100 vezes, (B) aumento de 500 vezes, (C) aumento de 1000 vezes.



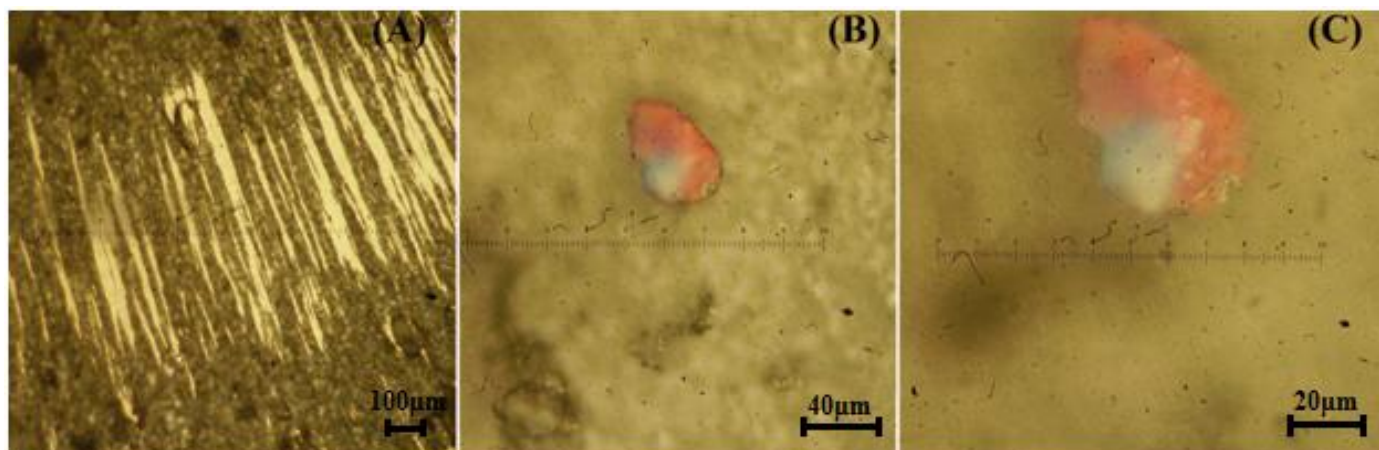
Fonte: Próprio autor

Figura 68: RPD da amostra do óleo de girassol com 2,5% de aditivo de origem vegetal, (A) aumento de 100 vezes, (B) aumento de 500 vezes, (C) aumento de 1000 vezes.



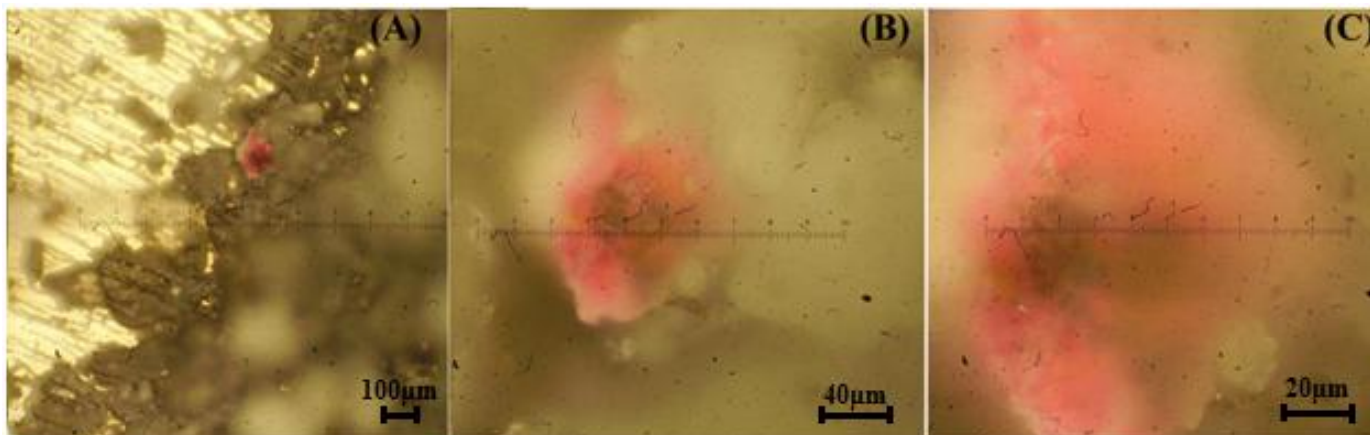
Fonte: Próprio autor

Figura 69: RPD da amostra do óleo de milho com 2,5% de ácido bórico, (A) aumento de 100 vezes, (B) aumento de 500 vezes, (C) aumento de 1000 vezes.



Fonte: Próprio autor

Figura 70: RPD da amostra de óleo de mineral com 5% de propil galato, (A) aumento de 100 vezes, (B) aumento de 500 vezes, (C) aumento de 1000 vezes.



Fonte: Próprio autor

4.1 Discussão dos Ensaio de Desgaste

Soja

O melhor resultado dentre os óleos de soja ensaiados foi obtido com a utilização do ácido bórico como aditivo. Com a adição de 5% desse aditivo obteve-se o melhor desempenho, com um desgaste de 0,10 g em relação ao ensaio com o óleo de soja puro que teve um desgaste de 0,30 g. Porém com a utilização de 2,5% do aditivo de ácido bórico não se obteve uma redução considerável, apresentando um desgaste de 0,29 g.

Uma hipótese, baseada nos trabalhos citados (REEVES, et al., 2012; RAO; KRISHNA, 2008; LOVELL, et al. 2010), é que a grande quantidade de partículas pequenas presentes na porcentagem de 5% de ácido bórico, fizeram com que essas pequenas partículas adentrassem nas asperezas dos corpos de prova diminuindo a sua rugosidade com a formação de uma película protetora.

Esse fator, em conjunto com as partículas maiores capazes de transportar a carga diminuindo o atrito, fez com que se diminuísse o desgaste, porém, com 2,5% as partículas

menores não conseguiram agir da mesma forma fazendo com que as partículas maiores atuassem também como abrasivas.

Em contrapartida com a utilização do aditivo Molykote obteve-se a maior taxa de desgaste dentre os óleos de soja ensaiados. Com 2,5% desse aditivo não se obteve nenhuma redução, apresentando o mesmo desgaste ocorrido com o óleo de soja puro.

Porém para a adição de 5% obteve-se o maior desgaste dentre os testes com óleo de soja aumentando para 0,40 g não tendo um efeito benéfico para esse óleo. A hipótese seria que esse aditivo possa ter diminuído a oleosidade do óleo com essa mistura e afetado a lubrificação.

Os combinados do tipo B e C tiveram um bom resultado também, com um desgaste de 0,18 g e 0,16 g. Podemos notar que no combinado tipo C a retirada do molykote, um dos aditivos com maiores desgastes obteve-se a melhor redução provando assim o efeito maléfico da utilização desse aditivo neste óleo.

O aditivo Propil Galato também apresentou um bom desempenho, sendo que com teores de 2,5% apresentou um desgaste de 0,15 g e com 5% um desgaste de 0,17 g.

Outro ponto interessante é a temperatura dos combinados que foram as que sofreram as menores variações dentre os óleos de soja ensaiados.

Canola

O melhor resultado para esse óleo ocorreu com a utilização do aditivo de origem vegetal. Com esse aditivo houve uma considerável redução do desgaste em relação ao óleo de Canola puro que apresentou um desgaste de 0,28 g. Com 2,5% o desgaste foi de 0,22 g e com utilização de 5% obteve-se a maior redução de desgaste dentre os testes realizados com o óleo de Canola com 0,05 g.

O maior desgaste, para este óleo, ocorreu com o uso do aditivo de Ácido Bórico. Com 2,5% obteve um desgaste de 0,44 g. Porém com a adição de 5% ocorreu uma taxa de desgaste muito pequena cerca de 0,06 g, da mesma forma que no óleo de soja.

Os combinados desse óleo apresentaram bons resultados. O tipo A com 0,09 g, o tipo B com 0,07 g e tipo C com 0,06 g. Da mesma forma que no óleo de soja, o aditivo Propil Galato também apresentou um bom desempenho, com 2,5% um desgaste de 0,15 g e com 5% 0,12 g.

Milho

Os testes com óleo de milho foram os que tiveram as maiores taxas de desgaste dentre todos os outros óleos testados.

Com relação ao óleo de milho puro que obteve um desgaste de 0,40 g. Os combinados foram os que tiveram melhor desempenho dentre os testes com esse óleo. O combinado tipo A teve um desgaste de 0,25 g, o tipo B com 0,24 g e o tipo C que apresentou o melhor resultado dentre os testes com 0,20 g.

Ao contrário do que ocorreu com o óleo de Canola, para o óleo de milho o aditivo de origem vegetal não demonstrou um bom rendimento. Com 2,5% teve um desgaste de 0,59 g e com 5% de aditivo 0,52 g.

Observamos também um bom resultado na redução do desgaste com a utilização 2,5% do aditivo de Molykote, porém ao aumentar a porcentagem notou-se também um aumento no desgaste tendo um efeito contrário ao requerido.

Girassol

Nos testes com o óleo de girassol puro obteve-se uma taxa de desgaste relativamente baixa comparada com o óleo de Soja, Canola e Milho puros. Seu desgaste foi de 0,18 g.

Para esse óleo o aditivo Molykote com 5% obteve uma boa redução do desgaste que já era pequeno, ficando com 0,13 g sendo o melhor resultado dentre os testes com esse óleo.

Já os combinados não tiveram bons resultados. O combinado tipo A obteve um desgaste de 0,27 g, o tipo B com 0,21 g e tipo C com desgaste de 0,28 g sendo o de maior desgaste dentre os testes com esse óleo.

Mineral

Os testes realizados com o óleo Mineral apresentaram as mais baixas taxas de desgaste dentre os óleos ensaiados que foi de 0,01 g.

Com a adição de 5% de Propil Galato aumentou-se o desgaste chegando a 0,06 g contra 0,01 g do Mineral, sendo o maior desgaste dentre os testes com esse óleo. Neste óleo os aditivos que tiveram melhor desempenho se compararam com o mineral puro ficando com 0,01 g de desgaste.

4.2 Discussão dos Ensaio PQA

Comparando os resultados dos ensaios no PQA (Tabelas 18 a 22 e Figuras 56 a 60) com os resultados dos ensaios de desgaste (Tabelas 8 a 12) e com as fotos das imagens dos roletes (Tabelas 13 a 17) observa-se que, para a maioria dos casos, houve coincidência entre os menores desgastes e os menores valores de PQA. Pela análise observamos que:

a - Para os óleos de Soja o aditivo ácido bórico com 5% foi o que apresentou o menor desgaste;

b - Para os óleos de Canola o aditivo ácido Bórico 5% e os Combinados foram os que apresentaram menores desgastes;

c- Para os óleos de Milho o aditivo Molikote 2,5% e os aditivos Combinados foram os que apresentaram menores desgastes;

d - Para os óleos de Girassol o aditivo Molikote 5% foi o que apresentou menor desgaste;

e- Para os óleos Minerais o aditivo Molikote 5% foi o que apresentou menor desgaste.

4.3 Discussão dos Ensaio de Espectrometria de Raio X

Com o aditivo Ácido Bórico e Molikote não houve desgaste do elemento P (fósforo), presente nos pares metálicos ensaiados, para os óleos de Soja, Canola e Girassol.

O elemento S (enxofre) está presente em todos os óleos aditivados com o aditivo Molikote, devido ao fato de este fazer parte da composição química do aditivo. Com maior teor de aditivação do Molikote, maior é o teor de S.

Este elemento, S, também está presente em grandes concentrações no óleo Mineral. Isto ocorre devido ao fato deste Lubrificante possuir um pacote de aditivos de extrema pressão contendo este elemento.

Observa-se uma relação proporcional entre os gráficos de Fe (ferro) e Mn (manganês) para cada óleo. Isto expressa os desgastes dos pares metálicos em atrito, uma vez que estes materiais contêm Fe e Mn como composição majoritária.

O aditivo Propil Galato fez com que houvesse o desgaste do componente P (fósforo), presente nas partes metálicas em contato para o óleo de Soja, Canola, Girassol e Mineral.

4.4 Discussão dos Ensaio RPD

Como a ferrografia é utilizada para verificar o tipo de desgaste dos componentes de máquinas, pelas Figuras 66 a 70, se notam apenas que todas apresentam condições de desgaste severo. Não é possível a análise individual de cada condição, pois o desgaste foi causado de maneira proposital, para se estudar os efeitos dos lubrificantes vegetais aditivados. Possível de verificação foi a presença de óxidos em algumas amostras e ausências em outras.

5 CONCLUSÕES

A Máquina projetada e construída comportou-se satisfatoriamente, de maneira constante e estável, para os ensaios de desgastes através do Método Reichert.

Levando em consideração as análises feitas no decorrer deste trabalho, podemos tirar algumas conclusões sobre o uso do óleo vegetal como possível lubrificante.

A Ferrografia, contagem de Partículas Magnéticas e Espectrometria de Raio X são ferramentas importantes para análise de desgaste onde este é pequeno, isto é, para desgaste considerado normal.

Para análise de desgaste excessivo, como é o caso deste trabalho, a Técnica de perda de massa se torna vantajosa e mais importante. A baixa relação entre os valores observados nas medidas de Espectrometria de Raio X com os Valores PQA e os de perda de massa, se deve ao desgaste excessivo que prejudica a retirada manual das amostras de óleo do cárter da Máquina de Desgaste para o recipiente do PQA e para o recipiente do Espectrômetro de Raio X. As grandes quantidades de partículas geradas nos ensaios de desgastes podem não ser completamente capturadas quando da transferência do óleo do Cárter para tais recipientes de ensaios.

Não foi possível encontrar um fator predominante que demonstrasse o melhor aditivo para o uso entre os óleos ensaiados, pois para cada óleo tivemos um aditivo diferente que melhor se adequou.

Assim como em outras pesquisas o aditivo de Ácido Bórico demonstrou que tem a capacidade de reduzir o desgaste, desde que suas formulações estejam nas proporções corretas, caso contrário terá um efeito negativo no sistema, como pode ser visto em alguns casos onde tínhamos 2,5% desse aditivo.

O aditivo de Propil Galato proporcionou bons resultados quando utilizado no óleo de Soja e Canola, porém nos outros óleos teve um efeito negativo, levando-se em conta apenas o desgaste obtido pela perda de massa e dimensões da parte desgastada.

Pelos resultados da Espectrometria de Raio X, à exceção do óleo Mineral, este aditivo foi benéfico para todos os óleos na concentração de 5%.

O aditivo de origem vegetal teve um excelente desempenho quando utilizado no óleo de Canola e de Girassol. Já para os outros óleos não houve reduções significativas do desgaste.

Os aditivos Combinados proporcionaram bons resultados para todos os óleos ensaiados, com exceção dos Combinados utilizados nas formulações com o óleo de girassol que causaram um aumento no desgaste. Outro ponto interessante é que as formulações com aditivos Combinados foram as que sofreram as menores variações de temperatura.

Observando as imagens das amostras do RPD, foi possível concluir que o aditivo Propil Galato (antioxidante) evitou a formação de óxidos, pois mesmo com uma varredura em toda a superfície das lâminas não foram encontradas partículas oxidadas (alaranjadas), diferentemente para as amostras de Soja Puro e com aditivo Ácido Bórico.

Também é possível ver partículas com cores vivas, como as azuis e vermelhas-cereja, encontradas na amostra de óleo de Soja Puro e Mineral com 5% de Propil Galato, resultantes de remoções de material a altas temperaturas.

O aquecimento do óleo durante o ensaio não é muito grande e não apresenta grandes mudanças com o uso de aditivos. Isso mostra o grande potencial desses óleos para serem utilizados como base para a produção de futuros biolubrificantes.

Os óleos vegetais como biolubrificantes em geral podem ser considerados promissores, desde que encontrada a sua concentração ideal de aditivos. Porém, ainda são necessários estudos com o intuito de projetar e viabilizar um refinamento para o uso destes óleos na área da lubrificação, para quem sabe num futuro próximo substituir grande parte dos lubrificantes minerais e sintéticos por biolubrificantes.

6 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Durante a execução do presente trabalho algumas idéias surgiram para futuros trabalhos:

a- Comparar estes óleos aditivados com um lubrificante Mineral Puro com as mesmas aditivações;

b - Repetir estes ensaios para outros modos de desgastes como Pin-on-disk e four ball;

c - Variar as concentrações de aditivos desde 0,1 até 10% para se obter o valor ótimo para cada caso;

d - Mudar os pares em contato, as velocidades e cargas de ensaios;

e - Após encontrada uma formulação ideal, compará-la a lubrificantes comerciais, para posteriormente testá-la em algum equipamento.

REFERÊNCIAS

ARATO JUNIOR, A. **Manutenção preditiva usando análise de vibrações**. São Paulo: Manole, 2004. 108 p.

BARRACLOUGH, T. G.; SPERRING, T. P.; ROYLANCE, B. J.; NOWELL, T., Generic-based wear debris identification –on the first step towards morphological classification. In: PROCEEDING OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONDITION MONITORING, 1999, Swansea. **Proceedings of the...** Oxford: Coxmore Publishing, 1999. p. 525-538.

BORAX Argentina S. A. **Ácido bórico**. Disponível em:
< <http://boraxargentina.com/pt/produtos/acidoborico>>. Acesso em: 29 maio 2014.

CUERVA, M. P. **Análise da influência da contaminação do lubrificante por biodiesel em um equipamento pin-on-disk**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2013.

CUNHA, R. C. **Análise do estado de conservação de um redutor de velocidade através da técnica de partículas de desgaste no óleo lubrificante auxiliada pela análise de vibrações**. 2005. 164 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2005.

ELER, G. J. **Ação do n-propil galato sobre o metabolismo do fígado de rato**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2009.

FARIAS, D. F. **Utilização da geometria disco-disco para investigação da capacidade de proteção ao desgaste de lubrificantes sob condições elastohidrodinâmicas**. 2005. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

GONÇALVES, A. C.; PADOVESE, L. R. Vibration and oil analysis for monitoring problems related to water contamination in rolling bearing. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA INTERNACIONAL DE TRIBOLOGIA – TriboBR 2010, 1, INTERNATIONAL TRIBOLOGY SYMPOSIUM OF IFTOMM, 2, 2010, Rio de Janeiro. **Proceedings of the...** Rio de Janeiro: [S.n.], 2010.

HALLING, J. **Principles of tribology**. New York: The Macmillan, 1975

HUTCHINGS, I. M. **Tribology: friction and wear of engineering materials**. Londres: Edward, 1992.

KARIN, P.; RICKARD, G. Tribological performance of a DLC coating in combination with water-based lubricants. **Tribology International**, Surrey, v. 36, n. 11, p. 851-855, 2003.

KATO, K.; ADACHI, K. Wear mechanisms. In: BHUSHAN, B. (Ed.). **Modern tribology Handbook: principles of tribology**. Boca Raton: CRC Press, 2001.

KIMURA, R. K. **Manutenção preditiva de redutores de velocidades e de motores de combustão interna, à diesel e biodiesel, através da análise do óleo**. 2009. 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2009.

LAGO, D. F. **Manutenção de redutores de velocidade pela integração das técnicas preditivas de análise de vibrações e análise de óleo lubrificante**. 2007. 179 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2007.

LOVELL R. M et al. Influence of boric acid additive size on green lubricant performance. **Philosophical Transactions. Série A, Mathematical, Physical, and Engineering Sciences**, London, v. 368, n. 1929, p. 4851-4861, 2010.

LUMOBRAS. **Molykote A-2**.

Disponível em: <<http://www.lumobras.com.br/marcas/molykote/suspensao/suspensao-molykotea2.html>> Acesso em: 29 maio 2014.

MARU, M. M. **Estudo do desgaste e atrito de um par metálico sob deslizamento lubrificado**. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2003.

MATOS, P. R. R. **Utilização de óleos vegetais como bases lubrificantes**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Instituto de Química, Universidade de Brasília, 2011.

RABINOWICZ, E. **Friction and wear of materials**. 2. ed. New York: John Willey and Sons, 1995.

MOURA, C.; CARRETEIRO, Ronald P.. **Lubrificantes e lubrificação**. 2.ed. Rio de Janeiro: J.R. Editora Técnica, Brasil, 1987.

PENSALAB. **Ponto de fluidez e nevoa**. Disponível em: <<http://www.pensalab.com.br/Laboratorio/PPP-5Gs-Ponto-de-Fluidez-e-Nevoa/flypage.tpl.html>>. Acesso em: 21 mar. 2014.

PEREZ, H. I. K. **Produção de biolubrificantes para usos especiais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, 2009.

QUIMIS. **Produtos**. Disponível em: <<http://www.quimis.com.br/produtos.php?cat=5&sub=31&prod=158>>. Acesso em: 05 dez. 2013.

QUINCHIA, A. L. et al. **Natural and synthetic antioxidant additives for improving the performance of new biolubricant formulations**. Huelva: Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ciencias Experimentales, Universidad de Huelva, Campus Universitario de El Carmen, 21071 Huelva, 2011. (Spain, Campus de Excelencia Internacional Agroalimentario, 2011).

RABINOWICZ, E. **Friction and wear of materials**. 2. ed. New York: John Willey and Sons, 1995.

RAO, D. N.; KRISHNA, P. V. Performance profiling of boric acid as lubricant in machining. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Science and Engineering**, Rio de Janeiro, v. 30, n. 3, p. 239-244, 2008. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/jbsmse/v30n3/a09v30n3.pdf>>. Acesso em: 15 jun. 2014.

REEVES, C. J. et al. Evaluating the tribological performance of green liquid lubricants and powder additives based green liquid lubricants. In: ANNUAL MEETING & EXHIBITION, 2012, St. Louis. **Proceedings of the STLE 2012...** Sta. Louis: [S.n.], 2012.

RIO+20: Conferência das nações unidas sobre desenvolvimento Sustentável. **Como chegamos aqui**. Disponível em: <http://www.rio20.gov.br/sobre_a_rio_mais_20/rio-20-como-chegamos-ate-aqui.html>. Acesso em: 19 jul. 2013.

SHIMADZU: **Analytical and measuring instruments**: espectrômetro de fluorescência de raios x por energia dispersiva. Disponível em: <http://www.shimadzu.com.br/analitica/produtos/elemental/raios_x/eds/edx.shtml > Acesso em : 05 dez. 2013.

SILVA, J. A. C **Obtenção de um lubrificante biodegradável a partir de ésteres do biodiesel de mamona via catálise enzimática e estudos de estabilidade oxidativa e térmica**. 2012. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

SPACH. **Biological microscopes**. Disponível em: <http://www.spachoptics.com/category_s/6.htm> Acesso em: 05 dez. 2013.

SPLABOR. **Equipamentos para laboratório**. Disponível em: <<http://www.splabor.com.br/equipamentos-laboratorio/titulador/titulador-automatico-digital-entrada-usd-e-bureta-25ml.html>> Acesso em: 05 dez. 2013.

STACHOWIAK, G. W.; BATCHELOR, A. W. **Engineering tribology**. 3. ed. New York: Elsevier, 2005.

SINATORA, A. **Tribologia**: um resgate histórico e o estado da arte. Prova de Erudição, São Paulo, 2005. Disponível em: <<http://pt.scribd.com/doc/19271149/ResgateHistoricoEstadoArte>>. Acesso em: 13 jun. 2013.

SUSKI, C. A. **Estudo do efeito de tratamento e revestimentos superficiais na vida de ferramentas de conformação mecânica a frio**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

TEXACO. **Fundamentos de lubrificação**. Apostila de lubrificação, 2005. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAABbwUAF/apostila-texaco-fundamentos-lubrificacao>>. Acesso em: 13 jun. 2013.

WILLIAMS, J. **Engineering tribology**. 1 ed. New York: Cambridge University Press, 2005.

WILSON, B. Industrial lubrication and tribology: lubricants and functional fluids from renewable sources. **Industrial Lubrication and Tribology**, Droitwich, v. 50, n. 1, p. 6 – 15, 1998.