

Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”

Faculdade de Engenharia – Campus de Ilha Solteira

Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica

Dissertação de Mestrado

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA CONTAMINAÇÃO DO LUBRIFICANTE POR
BIODIESEL EM UM EQUIPAMENTO PIN-ON-DISK**

Murilo Parra Cuerva

Discente

Aparecido Carlos Gonçalves

Orientador

Ilha Solteira

2013



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Ilha Solteira

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**"ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA CONTAMINAÇÃO DO LUBRIFICANTE POR
BIODIESEL EM UM EQUIPAMENTO PIN-ON-DISK"**

Murilo Parra Cuerva

Orientador: Prof. Dr. Aparecido Carlos Gonçalves

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia - UNESP – Campus de Ilha Solteira, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de Conhecimento: Mecânica dos Sólidos.

Ilha Solteira – SP

Novembro/2013

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação
Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação da UNESP - Ilha Solteira.

- | | |
|-------|--|
| C965a | <p>Cuerva, Murilo Parra.
Análise da influência da contaminação do lubrificante por biodiesel em um equipamento Pin-on-disk / Murilo Parra Cuerva. -- Ilha Solteira : [s.n.], 2013
157 f. : il.</p> <p>Dissertação (mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de Conhecimento: Mecânica dos Sólidos, 2013</p> <p>Orientador: Aparecido Carlos Gonçalves</p> <p>1. Manutenção preditiva. 2. Biodiesel. 3. Partículas de desgaste. 4. Óleos lubrificantes. 5. Análise de lubrificantes. 6. Motores de combustão interna. 7. Motor diesel. 8. Pin-on-disk.</p> |
|-------|--|



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

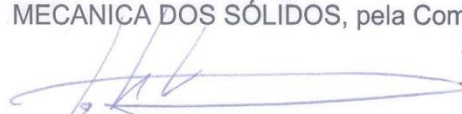
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: Análise da influência da contaminação do lubrificante por biodiesel em um equipamento Pin-on-disk

AUTOR: MURILO PARRA CUERVA

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. SAMUEL DA SILVA
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dr. EDUARDO CARLOS BIANCHI
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru

Data da realização: 30 de agosto de 2013.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiro à DEUS , nosso pai misericordioso, que com seu amor possibilitou que eu pudesse vir a ser mestre, sempre me ajudando de maneiras misteriosas e abrindo meu coração para as coisas boas, fazendo que eu tivesse a oportunidade de vivenciar todos os momentos e fizesse as escolhas certas.

Agradeço aos meus pais Donizete Aparecido Cuerva Guimarães e Elisabete Falchi Parra Cuerva, que se esforçaram e batalharam com muito amor e dedicação toda a vida para dar um futuro melhor à seus filhos, inclusive eu; fazendo da impossibilidade uma nova oportunidade. Agradeço a DEUS novamente por ter sempre pais presentes para qualquer situação.

Agradeço às minhas irmãs Maira Cuerva Sabatowski e Mariani Parra Cuerva por serem além de irmãs, minhas amigas em que posso confiar e contar a todo o momento.

Agradeço aos meus avós que contribuíram para meu desenvolvimento como pessoa com muito amor, José Antônio Cuerva Bernardi, Odete Guimarães Bernardi (in memoriam) e Maria Falchi Gomes.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Aparecido Carlos Gonçalves pelos ensinamentos na Engenharia e lições de vida. Fazendo-se ser mais do que um professor, tornando-se mais um amigo que carrego pra vida toda.

Agradeço também a todo excelente corpo docente da faculdade de Ilha Solteira por todos os ensinamentos e lições de vida, em especial os professores Antonio de Pádua Lima Filho, Gilberto Pechoto de Melo, José Luiz Gasche e Antonio Eduardo Turra. Também agradeço aos técnicos da Faculdade que foram amigos durante este percurso, Carlos José Santana, Edvaldo Silva de Araújo, Marino Teixeira Caetano.

Agradeço aos meus amigos: Giulio Dalmolin Cervo, Natallie Zilio de Souza, Maria Gabriella Ribeiro dos Reis, Carlos Henrique Vasques, Renan Andrades Esteves (in memoriam), Henrique Casarotti, Milena Nascimento, Willians França Leite, Fernando Ribeiro Alves, José Camilo Carranza Lópes, Bruno Caires, Ricardo

Mitrópapas, Leandro Alan, Victor Esperança, André Mantuan, Lara Tavares, Jenifer Monari Henck, além de todas as pessoas que fizeram parte da minha vida até aqui, pelo companheirismo e amizade, me ajudando a crescer em diferentes maneiras.

*Que Homem é o homem que
não torna o mundo melhor?*

*Qualis homo est ille qui orbem
terrarum meliorem non facit?*

RESUMO

A técnica de análise de óleo é um tipo de manutenção preditiva, feita coletando-se o óleo de um equipamento e analisando-o posteriormente ou analisando-o direta e continuamente em sistemas “on-line”. Em motores de combustão interna todas as peças possuem uma vida útil previamente estabelecida, com maior ou menor duração, de acordo com a função específica a elas atribuída. Pela análise do óleo podem-se monitorar as condições destas peças. A análise dos óleos permite identificar os primeiros sintomas de desgaste de um componente. A identificação é feita a partir do estudo da quantidade de partículas, tamanho, forma e composição das mesmas, presentes nas amostras de lubrificante, que fornecerão informações precisas sobre as condições das superfícies em movimento sem a necessidade de se desmontar o conjunto a qual estas partes pertencem. Tais partículas sólidas são geradas pelo atrito dinâmico entre as peças em contato no conjunto. De acordo com o estudo destas partículas podem-se relacionar as situações de desgaste do conjunto e atribuí-las a condições químicas e físicas. A análise dos óleos é feita por meios de técnicas laboratoriais que envolvem reagentes, instrumentos e equipamentos. O Laboratório de Análise de Partículas em Óleos-LAPO tem realizado vários trabalhos em motores de combustão interna a Diesel operando com biodiesel. Assim, para dar continuidade aos estudos foi aperfeiçoado um equipamento PIN-ON-DISK, já construído, utilizado para simular o efeito de possíveis contaminações de lubrificantes automotivos a diesel por biodieseis B5, Animal, Vegetal e Animal + Vegetal. Para isso foi feito um estudo teórico sobre os motores, lubrificantes e sobre os problemas e possíveis causas associadas às falhas destes. Além disso, diversos estudos acerca dos tipos de manutenção preditiva aplicadas a estes. Também foram vistos trabalhos de outros autores que tratam da manutenção preditiva em motores e sobre alguns ensaios PIN-ON-DISK. O lubrificante utilizado no ensaio foi contaminado por biodiesel, simulando uma situação possível de acontecer dentro de um motor de combustão interna. Através das análises dos lubrificantes extraídos destes ensaios foi feita a verificação dos desgastes comparativos devido à utilização do diesel comum e dos biodieseis.

Palavras-chaves: Manutenção preditiva. Biodiesel. Partículas de desgaste. Análise de lubrificantes. Motores de combustão interna a diesel. PIN-ON-DISK.

ABSTRACT

The oil analysis technique is a type of predictive maintenance, through collecting the oil from the equipment and analyzing it later in the laboratory or analyzing it directly and continuously via online systems. In internal combustion engines, the components have a pre-determined life span, being it a longer or shorter life, accordingly to the specific function assigned to each one of the parts. Using the oil analysis it's possible to monitor the conditions of such parts. That method can identify early on any symptoms of component wear. The identification is based on the study of the number, size, shape and composition of each particle; which are present in the lubricant samples. This provides accurate information about the conditions of the surfaces involved without requiring a complete disassemble of the machine. These solid particles are generated by dynamic friction among the parts in contact. Accordingly to the study of these particles, it's possible to identify the situations related to the wear and figure out the reasons why that's happening. These results can be related to the chemical and physical conditions that these surfaces are exposed to. The oil analysis is made with laboratorial techniques involving reagents, tools and equipments. The Laboratory for Particle Analysis in Oil (LAPO) has held several studies in internal combustion diesel engines operating with biodiesel. In order to continue these studies about wear debris the equipment PIN-ON-DISK was improved. This equipment was used to simulate the effect of potential contamination of lubricants by automotive diesel B5, Animal biodiesel, biodiesel made by Vegetable and biodiesel made by Animal plus Vegetables. In order to create this dissertation, there were studies of engines, lubricants, wear conditions and predictive maintenance. In addition, there were also studies on work done by other authors who deal with predictive maintenance on engines and PIN-ON-DISK tests. The lubricants used on these tests were contaminated by biodiesel, simulating a possible contamination from inside of an internal combustion engine. Through the analysis of the extracted lubricant from the tests it will be possible to verify and compare the wear due to the use of diesel and biodiesels.

Keywords: Predictive maintenance. Biodiesel. Wear particles. Lubricant analysis. Diesel internal combustion engines. PIN-ON-DISK.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Unidade destiladora da extração de petróleo.....	30
Figura 2 -	Os quatro cursos de um motor de ciclo Otto.....	37
Figura 3 -	Diferenças no filme lubrificante da lubrificação hidrodinâmica e Elastohidrodinâmica.....	40
Figura 4 -	Ilustração de tipos de filmes formados durante a lubrificação.....	41
Figura 5 -	Diagrama que relaciona a espessura do óleo com o desgaste e atrito.....	42
Figura 6 -	Modelo Tribológico.....	43
Figura 7 -	Fluxograma demonstrativo da relação entre condições de operação e tipo de desgaste proveniente.....	45
Figura 8 -	Mecanismos de desgastes.....	49
Figura 9 -	Classificação das partículas de desgaste.....	50
Figura 10 -	Relação entre mecanismos de desgaste e propriedades dos materiais.....	51
Figura 11 -	Malha feita por elementos finitos para previsão de desgaste.....	54
Figura 12 -	Diagrama de tensões cisalhantes e início do processo de formação de trincas.....	54
Figura 13 -	Demonstração de processos e produtos na refinaria.....	55
Figura 14 -	Estrutura molecular e aplicações dos óleos básicos.....	56
Figura 15 -	Processo de confecção final do óleo lubrificante.....	57
Figura 16 -	Representação da separação de dois fluidos por óleo lurificante em uma simulação do escoamento de Couette.....	61
Figura 17 -	Gráfico de viscosidade em função da temperatura.....	64

Figura 18 - Gráfico de um fluido newtoniano sob efeito de forças de cisalhamento.	65
Figura 19 - Gráfico de fluidos não-Newtonianos sob efeito de forças de cisalhamento	66
Figura 20 - Comportamento pseudoplástico.....	66
Figura 21 - Exemplo de óleos lubrificantes pseudoplásticos.	67
Figura 22 - Comportamento tixotrópico.	67
Figura 23 - Carta ASTM de mistura de viscosidades.	68
Figura 24 - Fatores que influenciam na temperatura.....	71
Figura 25 - Exemplo de distribuição de temperatura ao longo de um rolamento hidrodinâmico.....	71
Figura 26 - Escala de comparação de cores.	73
Figura 27 - Resistência à oxidação de acordo com a estrutura molecular.	74
Figura 28 - Gráfico de PH.....	77
Figura 29 - Processo de contaminação na combustão.....	78
Figura 30 - Gráfico comparativo entre óleos monograis e multigrais.	80
Figura 31 - Escala de comparação entre óleo de motor e de transmissão.....	82
Figura 32 - Exemplo da incidência e reflexão da luz no material e na camada oxidada.....	85
Figura 33 - Interação de duas ondas construtivamente.....	85
Figura 34 - Interação de duas ondas destrutivamente.	86
Figura 35 - Coloração e respectivo comprimento de onda.	86
Figura 36 - Transferência de elétrons entre material base e camada oxidada.	87

Figura 37 - Estas figuras mostram aço de baixa liga antes e depois do aquecimento à 330°C.....	88
Figura 38 - Estas figuras mostram aço de média liga (ferro fundido) antes e após aquecimento à 330°C.....	88
Figura 39 - Relação entre comprimento de onda e espessura da camada oxidada.....	89
Figura 40 - Modelo de transferência de elétrons..	90
Figura 41 - Varredura de espectro da amostra 16.....	91
Figura 42 - Processo de intervenção.....	92
Figura 43 - Demonstração da evolução dos custos de cada tipo de manutenção.	93
Figura 44 - Equipamento de Pin-on-disk.	94
Figura 45 - Demonstração da montagem do pino sobre o disco.	95
Figura 46 - Ensaios com o contaminante Diesel B5.	96
Figura 47 - Ensaios com o contaminante Biodiesel Vegetal (Girassol).	96
Figura 48 - Ensaios com o contaminante Biodiesel Vegetal (Girassol) & Animal (Sebo)	96
Figura 49 - Ensaios com o contaminante Biodiesel Animal (Sebo).	97
Figura 50 - Depositador Rotativo de Partículas	99
Figura 51 - Forno elétrico.	99
Figura 52 - Lâmina de vidro presa à ventosa.	100
Figura 53 - Óleo lubrificante colocado sobre a lâmina de vidro girando à 70 rpm.	101
Figura 54 - Monitor automático de partículas.	103
Figura 55 - Viscosímetro Saybolt.....	105

Figura 56 -	Aparato de medição do viscosímetro Saybolt.	105
Figura 57 -	Equipamento de ponto de fulgor dentro de uma capela.....	106
Figura 58 -	Aparato e procedimento do ponto de fulgor.	107
Figura 59 -	Microscópio OLYMPUS BX 41.....	108
Figura 60 -	Titulador potenciométrico HI902.	108
Figura 61 -	Aparato do experimento de TBN.....	110
Figura 62 -	Amostras preparadas.	111
Figura 63 -	Espectrômetro de Raio-X.....	112
Figura 64 -	Aparato para teste de dispersão.	112
Figura 65 -	Aparato do processo de aquecimento.....	113
Figura 66 -	À esquerda está o disco em forma de copo, feito de aço 8640, à direita está o pino de aço 4140	114
Figura 67 -	Montagem do sistema PIN-ON-DISK.....	114
Figura 68 -	Amostras coletadas dos ensaios em PIN-ON-DISK.....	115
Figura 69 -	Aparato do teste de rugosidade..	115
Figura 70 -	Gráfico de Viscosidade pela temperatura	117
Figura 71 -	Comparação entre os índices de viscosidade.....	118
Figura 72 -	Teste de dispersão para contaminação de 2% de biodiesel animal..	119
Figura 73 -	Teste de dispersão para contaminação de 5% de biodiesel animal...	120
Figura 74 -	Teste de dispersão para contaminação de 2% de biodiesel animal+vegetal	120
Figura 75 -	Teste de dispersão para contaminação de 5% de biodiesel animal+vegetal	121
Figura 76 -	Teste de dispersão para contaminação de 2% de biodiesel B5.....	121

Figura 77 -	Teste de dispersão para contaminação de 5% de biodiesel B5.....	122
Figura 78 -	Teste de dispersão para contaminação de 2% de biodiesel vegetal..	122
Figura 79 -	Teste de dispersão para contaminação de 5% de biodiesel vegetal..	123
Figura 80 -	Lâmina obtida através do ensaio em RPD.....	123
Figura 81 -	Do lado esquerdo é exposta a lâmina de $V = 0,2\text{m/s}$ e do lado direito é exposta a lâmina de $V = 1\text{m/s}$	124
Figura 82 -	Do lado esquerdo é exposta a lâmina de $V = 0,2\text{m/s}$ e do lado direito é exposta a lâmina de $V = 1\text{m/s}$	124
Figura 83 -	Do lado esquerdo é exposta a lâmina de $V = 0,2\text{m/s}$ e do lado direito é exposta a lâmina de $V = 1\text{m/s}$	125
Figura 84 -	Do lado esquerdo é exposta a lâmina de $V = 0,2\text{m/s}$ e do lado direito é exposta a lâmina de $V = 1\text{m/s}$	125
Figura 85 -	Do lado esquerdo é exposta a lâmina de $V = 0,2\text{m/s}$ e do lado direito é exposta a lâmina de $V = 1\text{m/s}$	126
Figura 86 -	Do lado esquerdo é exposta a lâmina de $V = 0,2\text{m/s}$ e do lado direito é exposta a lâmina de $V = 1\text{m/s}$	126
Figura 87 -	Do lado esquerdo é exposta a lâmina de $V = 0,2\text{m/s}$ e do lado direito é exposta a lâmina de $V = 1\text{m/s}$	127
Figura 88 -	Do lado esquerdo é exposta a lâmina de $V = 0,2\text{m/s}$ e do lado direito é exposta a lâmina de $V = 1\text{m/s}$	127
Figura 89 -	Do lado esquerdo é exposta a lâmina de $V = 0,2\text{m/s}$ e do lado direito é exposta a lâmina de $V = 1\text{m/s}$	128
Figura 90 -	Do lado esquerdo é exposta a lâmina de $V = 0,2\text{m/s}$ e do lado direito é exposta a lâmina de $V = 1\text{m/s}$	128
Figura 91 -	Do lado esquerdo é exposta a lâmina de $V = 0,2\text{m/s}$ e do lado direito é exposta a lâmina de $V = 1\text{m/s}$	129

Figura 92 -	Do lado esquerdo é exposta a lâmina de $V = 0,2\text{m/s}$ e do lado direito é exposta a lâmina de $V = 1\text{m/s}$	129
Figura 93 -	Do lado esquerdo é exposta a lâmina de $V = 0,2\text{m/s}$ e do lado direito é exposta a lâmina de $V = 1\text{m/s}$	130
Figura 94 -	Do lado esquerdo é exposta a lâmina de $V = 0,2\text{m/s}$ e do lado direito é exposta a lâmina de $V = 1\text{m/s}$	130
Figura 95 -	Do lado esquerdo é exposta a lâmina de $V = 0,2\text{m/s}$ e do lado direito é exposta a lâmina de $V = 1\text{m/s}$	131
Figura 96 -	Do lado esquerdo é exposta a lâmina de $V = 0,2\text{m/s}$ e do lado direito é exposta a lâmina de $V = 1\text{m/s}$	131
Figura 97 -	Ferrograma após aquecimento com zoom de 500X.....	132
Figura 98 -	Ferrograma após aquecimento com zoom de 500X	133
Figura 99 -	Ferrograma após aquecimento com zoom de 500X	133
Figura 100 -	Ferrograma após aquecimento com zoom de 500X	134
Figura 101 -	Ferrograma após aquecimento com zoom de 500X	134
Figura 102 -	Ferrograma após aquecimento com zoom de 500X	135
Figura 103 -	Ferrograma após aquecimento com zoom de 500X à esquerda e zoom de 1000X à direita.	135
Figura 104 -	Ferrograma após aquecimento com zoom de 1000X.....	136
Figura 105 -	Ferrograma após aquecimento com zoom de 500X	136
Figura 106 -	Ferrograma após aquecimento com zoom de 500X à esquerda e zoom de 1000X à direita.	137
Figura 107 -	Ferrograma após aquecimento com zoom de 500X	137
Figura 108 -	Ferrograma após aquecimento com zoom de 500X	138
Figura 109 -	Ferrograma após aquecimento com zoom de 500X	138

Figura 110 - Ferrograma após aquecimento com zoom de 500X	139
Figura 111 - Ferrograma após aquecimento com zoom de 1000X.....	139

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Quadro comparativo das propriedades do Diesel com o Biodiesel.	33
Tabela 2 -	Morfologia das partículas e modo de desgaste.	50
Tabela 3 -	Grupo de óleos depois de refinados e propriedades.	57
Tabela 4 -	Equações de relação entre viscosidade e temperatura e comentários.	63
Tabela 5 -	Densidade, calor específico, condutividade térmica e difusividade térmica para alguns materiais.	70
Tabela 6 -	Tensão superficial para diferentes materiais.	75
Tabela 7 -	Classificação de viscosidade para motor de combustão interna.	80
Tabela 8 -	Classificação de viscosidade para óleos de transmissão.	81
Tabela 9 -	Propriedades físico-químicas do lubrificante API CF SAE 40.	97
Tabela 10 -	Especificações do depositador rotativo de partículas.	98
Tabela 11 -	Especificação do monitor automático de partículas.	103
Tabela 12 -	Peso de óleo e diluente.	111
Tabela 13 -	Tabela com medidas e valores médios de rugosidade do disco e pino.	116
Tabela 14 -	Valores de Viscosidade Saybolt para cada tipo de contaminação.	116
Tabela 15 -	Valores de índice de viscosidade.	118
Tabela 16 -	Valores do ponto de fulgor após as contaminações.	140
Tabela 17 -	Valores do PQA após todos os ensaios.	140
Tabela 18 -	Valores do espectrômetro de raio-X.	142
Tabela 19 -	Valores calculados de acordo com a diluição de cada amostra.	143
Tabela 20 -	Gráficos dos elementos das amostras.	143

Tabela 21 - Valor de TBN para cada amostra testada	147
Tabela 22 - Gráfico do PH pela quantidade de Titulante adicionado na amostra .	147

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	Trabalhos na área estudada	23
1.2	Objetivo do trabalho.....	27
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	28
2.1	Histórico	28
2.2	Combustíveis	29
2.2.1	<i>Diesel</i>	29
2.2.2	<i>Biodiesel</i>.....	31
2.2.3	<i>Comparação entre diesel e biodiesel</i>	32
2.3	Pin on disk	34
2.4	Motor de combustão interna	35
2.5	Lubrificação	38
2.6	Tipos de lubrificação.....	39
2.7	Tribologia	42
2.8	Desgaste.....	43
2.8.1	<i>Desgaste adesivo</i>	45
2.8.2	<i>Desgaste abrasivo</i>.....	46
2.8.3	<i>Desgate por Fadiga</i>	47
2.8.4	<i>Delaminação</i>	47
2.8.5	<i>Fratura de cisalhamento</i>	48
2.8.6	<i>Corrosão ou Oxidação</i>	48
2.8.7	<i>Desgaste por atrito</i>.....	48
2.9	Modelagem de desgaste	51
2.9.1	<i>Método de Elementos Finitos para a previsão de desgaste</i>	53
2.10	Composição dos óleos lubrificantes	54
2.11	Processo de Produção dos lubrificantes	57
2.11.1	<i>Óleos provenientes de petróleo</i>	58
2.11.2	<i>Óleos sintéticos</i>.....	58
2.12	Propriedades Físicas dos Lubrificantes.....	60

2.12.1	<i>Viscosidade do óleo</i>	60
2.12.2	<i>Viscosidade Dinâmica</i>	61
2.12.3	<i>Viscosidade Cinemática</i>	62
2.12.4	<i>Relação entre temperatura e viscosidade</i>	63
2.12.5	<i>Relação entre Viscosidade e Pressão</i>	64
2.12.6	<i>Relação entre Viscosidade e Cisalhamento</i>	65
2.12.7	<i>Viscosidades de misturas</i>	67
2.13	<i>Propriedades térmicas dos lubrificantes</i>	68
2.13.1	<i>Calor específico</i>	68
2.13.2	<i>Condutividade Térmica</i>	69
2.13.3	<i>Difusividade térmica</i>	69
2.13.4	<i>Características do lubrificantes sob influência da temperatura</i>	72
2.13.5	<i>Coloração</i>	73
2.13.6	<i>Ponto de combustão</i>	73
2.13.7	<i>Volatilidade e Evaporação</i>	74
2.13.8	<i>Estabilidade à oxidação</i>	74
2.13.9	<i>Estabilidade térmica</i>	75
2.13.10	<i>Tensão superficial</i>	75
2.13.11	<i>Número de neutralização</i>	76
2.13.12	<i>Resíduo de carbono</i>	78
2.14	<i>Classificação da viscosidade</i>	79
2.14.1	<i>Classificação Viscosidade SAE</i>	79
2.15	<i>Aditivos</i>	82
2.16	<i>Contaminantes e impurezas dos óleos lubrificantes</i>	83
2.16.1	<i>Teor de água</i>	83
2.16.2	<i>Teor de enxofre</i>	83
2.16.3	<i>Teor de cinzas</i>	83
2.16.4	<i>Teor de cloro</i>	84
2.17	<i>Aquecimento de ferrogramas</i>	84
2.18	<i>Espectrômetro de Raio X</i>	90
2.19	<i>O custo do atrito e desgaste</i>	91

3	MATERIAIS E MÉTODOS	94
3.1	Depositor Rotativo de Partículas- RPD	98
3.1.1	<i>Processo de confecção de amostras no RPD.....</i>	99
3.2	Ferrografia Quantitativa	102
3.2.1	<i>Monitor de Partículas Ferrosas</i>	102
3.3	Viscosímetro	104
3.4	Ponto de Fulgor	105
3.5	Ferrosópio.....	107
3.6	TBN	108
3.7	Espectrômetro de Raio-X.....	110
3.7.1	<i>Preparação das amostras</i>	110
3.7.2	<i>Ensaio no Espectrômetro de Raio-X.....</i>	111
3.8	Teste de Dispersão.....	112
3.9	Tratamento com calor	113
3.10	Análise de mudança de cor	113
4	RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÃO	114
4.1	Rugosidade	115
4.2	Viscosidade Saybolt.....	116
4.3	Índice de viscosidade	117
4.4	Aditivo de Dispersão	119
4.5	Ferrografia Analítica.....	123
4.6	Heating	132
4.7	Ponto de Fulgor	140
4.8	PQA.....	140
4.9	Espectrômetro de raio-x	142
4.10	Número de basicidade (reserva alcalina)	147
5	CONCLUSÕES	150
6	PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	152
	REFERÊNCIAS	153

1 INTRODUÇÃO

Na década de 1930, a patente Belga 422.877, concedida ao pesquisador G. Chavanne da Universidade de Bruxelas apresentou o primeiro relato do que atualmente é conhecido como Biodiesel. Na patente, o uso de ésteres etílicos de óleo de palma foram obtidos a partir do processo de transesterificação por meio ácido. Logo depois, em 1938, uma linha de ônibus entre Bruxelas e Louvain, utilizou ésteres etílicos, obtendo resultados satisfatórios na época (KNOTHE et al., 2006 apud KIMURA, 2010).

Com o surgimento da II Guerra Mundial, as linhas de abastecimento de petróleo foram cortadas, causando, assim, a escassez de combustíveis fósseis. Com isso, ocasionou-se o estímulo a busca de fontes alternativas (KIMURA, 2010).

Durante a II Guerra Mundial, o combustível de origem vegetal foi utilizado extensamente em vários países, dentre eles China, Índia e Bélgica. Porém, o desenvolvimento dos combustíveis de origem vegetal foi praticamente abandonado quando o fornecimento de petróleo foi restabelecido com o final da guerra e o preço do petróleo tornou-se novamente atrativo (KIMURA, 2010).

Atualmente, sabe-se que os motores a Diesel podem ser adaptados para utilizar como combustível os óleos vegetais in natura. No ano de 1991, foi produzido o primeiro lote de 10 toneladas de Biodiesel na Alemanha, a partir de óleo de canola, sendo é distribuído de forma pura, isento de mistura ou aditivos, para a rede de abastecimento de combustíveis compostas por cerca de 1700 postos (KIMURA, 2010).

A Alemanha estabeleceu um expressivo programa de produção de Biodiesel a partir da canola, sendo em 2007, o maior produtor e consumidor europeu de Biodiesel, com capacidade de 1 milhão de toneladas por ano. A Itália vem produzindo Biodiesel desde meados da década de 1990 a partir da canola e do girassol, sendo, que parte do produto é destinada para o aquecimento das residências, no qual pode ser usado na proporção de até 100 % (B100), e para o sistema de transportes, cuja proporção de mistura varia entre 5 e 25 %. Grande parte do Biodiesel produzido na Itália é consumido pelo setor de transportes públicos (cerca de 80 %) (KIMURA, 2010).

No caso da França, com a produção derivada da canola e do girassol, o uso de Biodiesel vem se disseminando desde 1991. Porém, diferentemente da Alemanha, neste país o Biodiesel é utilizado somente de forma misturada ao óleo Diesel derivado do petróleo, sendo que as proporções variam muito em cada setor. Por exemplo, os ônibus que fazem o transporte urbano trafegam com uma mistura que varia entre 5 e 30 %, enquanto que nas refinarias de petróleo estão sendo adicionados 5 % de Biodiesel ao óleo Diesel normal (KIMURA, 2010).

A China, segundo maior importador de petróleo do planeta, começou a utilizar Biodiesel para o abastecimento de veículos em 2007, na tentativa de diminuir a dependência do combustível fóssil. Ela possui cinco unidades transesterificadoras de óleo de canola e óleo de fritura usado que produzem um volume de Biodiesel superior à produção americana, mas inferior à produção europeia. O governo chinês estimula o desenvolvimento do Biodiesel e pretende possuir uma capacidade de produção de 10 milhões de toneladas anuais até 2020 em substituição do petróleo (PENTEADO; CUNHA; PENTEADO, 2007 apud KIMURA, 2010).

Merece destaque também o papel dos EUA na área de Biodiesel, uma vez que várias iniciativas estão sendo desenvolvidas por esse país no sentido de preservar o meio ambiente. Em 2002 foi promulgada a lei 517/2002, que criou o programa Biodiesel norte-americano, cuja meta de produção foi fixada ao redor de 20 bilhões de litros ao ano. Para tanto, a proporção inicial de adição do Biodiesel ao óleo Diesel tradicional foi de 20 %, sendo o óleo popularmente chamado de EcoDiesel B20. Essa lei prevê o uso crescente de Biodiesel pelo sistema de transportes e também pela frota de automóveis particulares. Institucionalmente também foi criado o National Biodiesel Board, com a função de coordenar todas as ações e políticas neste campo energético específico (KIMURA, 2010).

Na América Latina, destaca-se a produção de Biodiesel na Argentina, que desde 2001 vem incentivando a expansão deste produto. Através do Decreto 1.396 (Novembro de 2001) instituiu-se o “Plano de Competitividade do Combustível Biodiesel” com a finalidade de incentivar investimentos (externos e internos) na produção do combustível, cuja matéria-prima básica é a soja e, com menor expressão, o girassol. Neste mesmo ano, também foram instituídas normas de controle de qualidade do produto, sobretudo em termos dos testes exigidos e das regras de comercialização do produto (MATTEI, 2008 apud KIMURA, 2010).

O Brasil possui uma extensa área de plantio para as matérias-primas que servem para a obtenção do Biodiesel. Vale ainda ressaltar que cada região possui um ou mais tipos de oleaginosas que podem ser aproveitadas para tal propósito, originando uma variedade de cultura no país. O país cultiva 56 milhões de hectares e tem mais 90 milhões de terras disponíveis. Os 225 milhões de hectares de pastagem existentes no país deverão, devido ao aumento da tecnologia, reduzir em 15 % nos próximos anos, sem redução da produção de bovinos. Estas terras disponíveis poderão ser usadas na produção de oleaginosas e, conseqüentemente, de Biodiesel. O Programa Brasileiro de Biodiesel visa à utilização apenas de terras inadequadas para o plantio de gêneros alimentícios (PENTEADO; CUNHA; PENTEADO, 2007 apud KIMURA, 2010).

Como o Brasil apresenta condições climáticas e geográficas favoráveis à produção do biodiesel, o país se vê em um papel decisivo no âmbito internacional para a utilização do mesmo. Devido às novas descobertas sobre o aquecimento global, a sociedade cada vez se preocupa mais em utilizar fontes de energia renováveis e menos poluentes, como é o caso do biodiesel. Deste modo, há um crescimento do uso do biodiesel para complementar o diesel B5, que já é comercializado (KIMURA, 2010).

Sendo assim, vê-se a necessidade de fazer o estudo de quais implicações decorrerão do uso do mesmo, quais são suas características e afins. E como já é conhecido, o combustível que vai para a câmara de combustão contamina o óleo lubrificante, que faz a proteção das partes do motor (KIMURA, 2010).

Por isso a necessidade de se estudar tribologicamente os efeitos da contaminação do óleo lubrificante, com vários tipos de biodiesel e assim comparar com o diesel B5 já existente e em uso. Para isso, um método menos custoso e nem por isso menos eficiente, possibilita a análise destas contaminações e seus efeitos, que é o método de pin-on-disk, em que é simulado o desgaste que normalmente ocorreria no motor de combustão interna, levando em conta a lubrificação contaminada por diferentes porcentagens de biodiesel (KIMURA, 2010).

1.1 Trabalhos na área estudada

Aqui são apresentados alguns trabalhos realizados na área estudada. Nesta parte há a intenção de que o leitor visualize a amplitude que pode ser obtida através

dos testes de pin-on-disk, mostrando que o trabalho realizado é presente nas mais diversas áreas, como por exemplo, desde estruturas de construção a até implantes médicos. Segue alguns trabalhos:

- Hsin-Han, Chau-Chang e Jyn-Wei (2010) depositaram camadas de Cr-Si-N na superfície de materiais para verificar o comportamento desta camada no desgaste, variando a quantidade de silício. Para a execução dos testes foi utilizado o equipamento de pin-on-disk. Os testes no pin-on-disk foram feitos em três ambientes distintos, primeiro utilizando uma atmosfera ambiente com 55% de umidade, depois com água destilada e por fim, com uma solução aquosa de 0,01M de NaCl.

A carga aplicada nos testes foi de 0,49N e a velocidade de deslizamento foi de 0.015m/s sobre a trilha circular de desgaste de 2,8mm de diâmetro. O teste era finalizado quando era atingido uma distância de 22m.

Os resultados obtidos por Hsin-Han, Chau-Chang e Jyn-Wei mostraram que para o filme composto por Cr-Si-N com a mesma quantidade de Silício e utilizando água destilada, o coeficiente de atrito foi o menor; já utilizando a solução de 0,01M de NaCl, o desgaste foi mais severo do que quando submetido somente a atmosfera proposta. Todos os coeficientes de desgaste aumentaram conforme foi aumentado o teor de silício na composição. Já a fase amorfa SiN_x da composição Cr-Si-N, demonstrou que é capaz de reduzir a fricção no ambiente atmosférico.

- Kouhanjani, Bidaki e Akbari-Fakhrabadi (2009) prepararam uma liga de cobre com 0,64% em peso de cromo para realizar testes de desgaste. As amostras foram envelhecidas a 500°C de 1 à 4 horas. Estas amostras preparadas foram utilizadas como pino para o equipamento de pin-on-disk. Estes pinos atritaram com um disco de aço 52100 de dureza 60HRC, sob nenhum efeito de lubrificação.

O disco de aço foi feito com um diâmetro de 40 mm e 5 mm de espessura. Os testes foram realizados com velocidades de 0,3, 0,5 e 0,7m/s, sob carregamentos de 20, 40 e 60N, onde foi percorrida uma distância de 1000m.

Kouhanjani, Bidaki e Akbari-Fakhrabadi (2009) verificaram nos seus experimentos que a menor perda de massa decorreu no carregamento de 20N e velocidade de 0,7m/s. Por outro lado, a maior perda de massa, ou seja, desgaste aconteceu quando o equipamento foi submetido à 60N de carga e a uma velocidade de 0,3m/s. Eles também observaram que o coeficiente de atrito tendeu a decrescer sob carregamento de 20N e 40N e velocidade de deslocamento de 0.7m/s ao longo do teste. Este efeito foi devido à formação de uma camada intermetálica muito dura

de óxido. Para carregamento de 60N e velocidades maiores de 0.5m/s esta camada é destruída.

- Guerrazi et al. (2009) testaram o comportamento do contato estático e cinético de uma esfera de aço contra polietileno, utilizando o equipamento de pin-on-disk. Envelhecaram pedaços de revestimentos de canos de polietileno para simular o envelhecimento natural, a primeira amostra foi envelhecida através da imersão em água destilada e a segunda em água do mar, ambas à temperatura de 70°C, por 6 meses.

Os ensaios no equipamento de pin-on-disk foram realizados sob carregamentos e velocidades constantes em um ambiente seco. A velocidade utilizada foi de 0,125m/s, sob carregamentos de 1,5 e 10N e foram percorridas distâncias de 226, 2260 e 6782m.

Chegaram a conclusão que o coeficiente de atrito aumenta até chegar a um patamar, depois disso se encontra constante. Não há diferença relevante entre o coeficiente de atrito para o material original e o envelhecido. Por fim, O envelhecimento higrotérmico apresentou um fator prejudicial quanto ao desgaste, o material envelhecido apresentou um maior desgaste se comparado ao material original, especialmente quando testado por longos períodos.

- Huang (2006) testou nanofolhas de grafite como aditivo para óleo parafínico. As nanofolhas tinham cerca de 500 nm de diâmetro e 15 nm de espessura e foram produzidas através de moagem de esferas. Os testes para a verificação do desgaste e validação do novo aditivo foram feitos em um equipamento de pin-on-disk.

Huang (2006) verificou que com a adição das nanofolhas de grafite houve uma melhora no desempenho do lubrificante, quanto à resistência ao desgaste e capacidade de carga. Também foi observado que o coeficiente de atrito diminui com a adição das nanofolhas. Através dos testes foi descoberto que as nanofolhas de grafite formam uma camada protetora em torno da ponta do pino de aço do aparelho, o que evita que as partes se toquem, resultando em um melhoramento no coeficiente de atrito e no desgaste.

Desta forma houve a confrontação dos resultados obtidos com a adição e sem a adição das nanofolhas, sendo visto que o uso do aditivo decorreu em um melhoramento no desempenho se comparado ao óleo parafínico puro.

- Gispert et al. (2006) fizeram o estudo dos mecanismos de atrito e desgaste para juntas de próteses de quadril, sob efeito de vários lubrificantes. O estudo foi

realizado em um aparato de pin-on-disk utilizando polietileno de peso ultra molecular, aço inoxidável, uma liga de CO-28Cr-6Mo e alumina. Para reduzir o desgaste foram utilizados 4 tipos de lubrificantes, uma solução salina equilibrada de Hank (HBSS), a anterior HBSS mais sal de sódio de ácido hialurônico (HA), HBSS mais albumina de soro bovino (BSA) e por fim HBSS mais BSA e HA. A montagem do pin-on-disk consistiu em colocar a alumina, o aço inoxidável austenítico e a liga de CO-28Cr-6Mo como pinos, atritando contra o disco de polietileno de peso ultra molecular.

Gispert et al. (2006) observaram que o coeficiente de atrito aumentou durante os testes devido a transferência do filme protetor polimérico para o "contra corpo" quando não havia proteína presente no lubrificante. Diferentemente do descrito anterior, quando o lubrificante continha BSA a transferência do filme era inexistente, assim o coeficiente de atrito continuava baixo ao longo do teste.

- Shanta (2011) estudou a contaminação de biocombustíveis em óleo mineral, visando o aspecto da tribologia e do estudo do desgaste. Para tanto, foi utilizado um disco de aço AISI 1018 e um pino de aço inoxidável AISI 316 para montagem do equipamento de teste, o pin-on-disk. O óleo mineral que foi utilizado no experimento foi o 15W40 e os biocombustíveis contaminantes foram, óleo de canola, óleo de amendoim, óleo de soja e óleo de gordura de galinha.

O experimento foi executado sob ambiente controlado de 17°C à 19°C e umidade relativa de 55% à 60%. Os testes foram rodados sob um carregamento de 19,2N a uma velocidade de 0,15m/s e por uma distância de 1000m. O nível de contaminação dos biodieseis no óleo lubrificante foram de 5%, 10% e 30% em massa.

Shanta verificou que qualquer tipo de contaminação no óleo resulta na diminuição das propriedades de proteção do óleo lubrificante. Os resultados achados mostram que os tipos de contaminantes utilizados tem o mesmo efeito no desgaste se comparados ao diesel normal, dependendo somente da porcentagem de contaminação. Através do experimento Shanta também concluiu que a contaminação por biodiesel animal se mostrou menos maléfica se comparada aos biodieseis vegetais utilizados nos testes.

- Iglesias (2004) fez o estudo do atrito e desgaste do contato entre alumínio e aço, sob deslizamento lubrificado. O óleo lubrificante foi aditivado com um fluido

neutro e cristais iônicos líquido. Os testes foram realizados utilizando alumínio ASTM 3211 como disco e AISI 52100 como pino, para a montagem do aparelho de testes de desgaste, o pin-on-disk.

A aditivação foi de 1% em massa para os seguintes componentes: cristal iônico líquido de n-dodecylammonium (LC3); fluidos neutros: uma espécie não polar 4-dibutylazobenzeno (LC1) e um derivado do colesterol, o colesterol linoleato (LC2).

O aparelho foi programado para executar uma velocidade constante ao longo do teste. Iglesias (2004) chegou a conclusão que a utilização de aditivos de cristais líquidos reduz o coeficiente de atrito e de desgaste do alumínio contra o aço. A capacidade de lubrificação do cristal líquido iônico foi comparada com os outros dois cristais líquidos neutros e os resultados dependem quase que exclusivamente das condições experimentais, mas também foi verificado que sob o aumento da carga o cristal iônico líquido mostra um comportamento melhor do que os neutros.

Por fim, Iglesias (2004) chegou a conclusão que quando o óleo lubrificante é aditivado com uma mistura iônica e cristal líquido não-polar, apresenta um desgaste e um coeficiente de atrito menor do que quando há a adição de apenas um dos componentes.

1.2 Objetivo do trabalho

Os objetivos destes trabalhos são:

- a) Levantamento bibliográfico sobre motores de combustão interna à diesel;
- b) Levantamento bibliográfico sobre Lubrificantes de Motores de Combustão Interna;
- c) Levantamento bibliográfico sobre análise de óleo como técnica de manutenção preditiva em Motores de Combustão Interna;
- d) Aperfeiçoamento da máquina de desgaste PIN-ON-DISK existente;
- e) Análise comparativa, através da análise do lubrificante, dos desgastes dos pinos e do disco com os vários tipos de contaminações impostas;
- f) Análise de amostras de óleo para auxiliar os estudos.
- g) Verificação da influência do tipo e concentração de biodiesel nos lubrificantes e nos motores de combustão interna.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Histórico

Por volta de 2600 a.C. foi encontrado vestígios da primeira forma de lubrificação conhecida pelo homem. No Egito antigo havia a necessidade de se transportar blocos para a construção das pirâmides e afins; as pedras colossais eram colocadas em cima de trenós feitos de madeiras e arrastadas. A lubrificação era feita na parte de baixo do trenó para a redução do atrito com sebo de boi ou de carneiro. Já em outra época, na Grécia celebravam-se os primeiros jogos olímpicos que se têm notícias. Uma das modalidades presentes na época era a corrida de Bigas, que tinham os eixos lubrificados por gordura animal também (CARRETEIRO, 1975).

Após longo período, já na idade média a gordura animal foi usada para lubrificar o mecanismo de abertura dos portões dos castelos que rangiam e nas rodas das carruagens. Na mesma época, na Noruega, os Vikings guerreiros e aventureiros marítimos, eram exímios construtores de barcos e nestes barcos era usado óleo de gordura de baleia para lubrificar o suporte de articulação das velas e o eixo do leme (CARRETEIRO, 1975).

No início das grandes navegações comerciais Portuguesas e Espanholas, o óleo de baleia era usado para lubrificar as articulações dos navios. Com o desenvolvimento da civilização e com a crescente produção de novas invenções, houve também uma evolução nas técnicas da lubrificação. Já em 1800, na Pensilvânia (Estados Unidos) ocorreram alguns fatos curiosos. Em 1859, um ex-maquinista de trem, Edwin Drake, perfurou o primeiro poço de petróleo com 21 metros de profundidade, tinha a produção de 3000 litros de petróleo por dia. Também durante este século, com o advento do trem a vapor, houve a necessidade da lubrificação nos mesmos, mais largamente usada nos mancais. Com a evolução das máquinas, houve cada vez mais a necessidade de uma lubrificação mais apurada e constante (CARRETEIRO, 1975; CLAUDINO, 2000).

Com a vinda das grandes guerras houve uma evolução muito grande no ramo de lubrificação, onde era necessária a lubrificação de canhões e máquinas mais pesadas e potentes. Com a revolução industrial houve a necessidade de se

diferenciar os óleos lubrificantes para cada uso específico, prolongando a vida útil de cada elemento da máquina (CARRETEIRO, 1975).

2.2 Combustíveis

Combustíveis são substâncias, na forma líquida, sólida ou gasosa, que reagem com O_2 (oxigênio). A reação é altamente exotérmica, usualmente liberando essa energia na forma de calor, chamas e gases (TEXACO, 2005).

2.2.1 Diesel

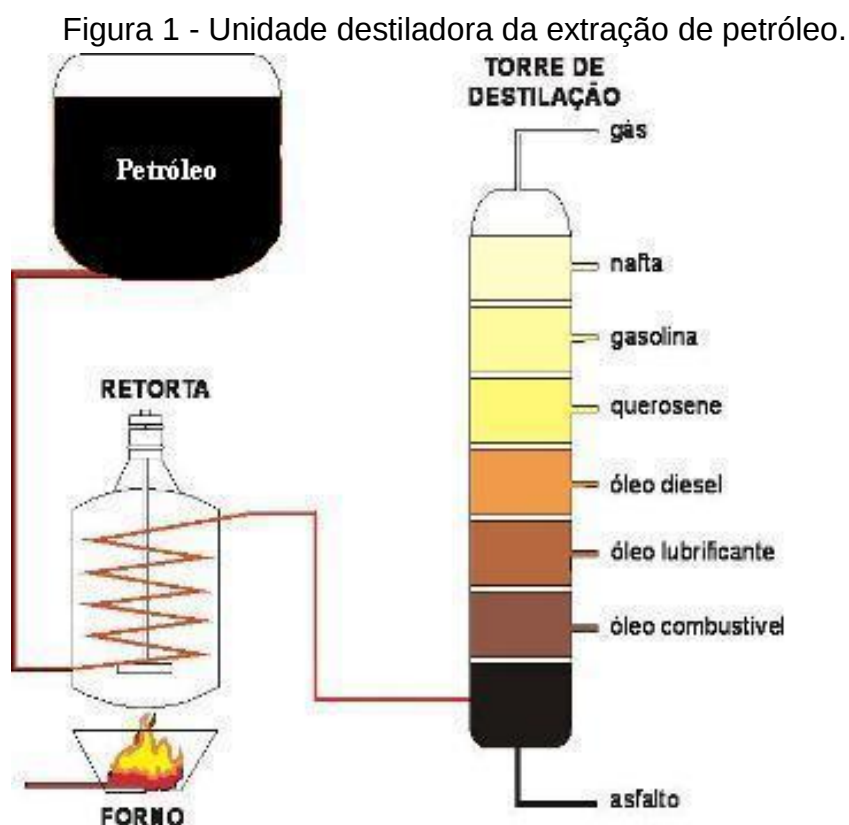
O óleo diesel é um combustível derivado do petróleo, constituído basicamente por hidrocarbonetos alifáticos, o óleo diesel é um composto formado principalmente por átomos de carbono, hidrogênio e em baixas concentrações por enxofre, nitrogênio e oxigênio. É selecionado de acordo com as características de ignição e de escoamento adequadas ao funcionamento dos motores diesel. É um produto pouco inflamável, medianamente tóxico, pouco volátil, límpido, isento de material em suspensão e com odor forte e característico. Enquanto ele é destilado do petróleo a temperaturas na faixa de 160 a 410°C, a gasolina é destilada na faixa de 80 e 120°C (TEXACO, 2005).

O combustível recebeu este nome em homenagem ao engenheiro alemão Rudolf Diesel que inventou um meio mecânico para explorar a reação química originada da mistura de óleo e oxigênio presente no ar. Pelo fato da mistura diesel e ar produzirem uma forte explosão quando comprimida, tal reação passou a ser utilizada para gerar energia e movimentar máquinas e motores de grande porte. Os motores são conhecidos como motores do ciclo diesel e são empregados em automóveis de passeio, furgões, ônibus, caminhões, pequenas embarcações marítimas, máquinas de grande porte, locomotivas, navios e aplicações estacionárias como os geradores elétricos (TEXACO, 2005).

Em função dos tipos de aplicações, o óleo diesel apresenta características e cuidados diferenciados para conservar sempre o mesmo ponto de fulgor e não fugir dos padrões de ignição preestabelecidos por essa tecnologia. Porém, em alguns países, essa regra vem sendo descumprida e já é costume os governos permitirem a mistura de outras substâncias ao óleo diesel. Apesar de nos veículos motorizados a

utilização do diesel ser mais poluente para o meio ambiente devido a sua composição química, ele oferece maior segurança na prevenção de incêndios em casos de perigo de fogo. Isto porque este combustível apenas é inflamável pelo fogo se encontrar sob altíssimas temperaturas ou altíssimas pressões (TEXACO, 2005).

Na Figura 1 tem-se uma torre de destilação de petróleo onde pode ser notado que o diesel é extraído a temperaturas mais elevadas que a gasolina.



Fonte: Texaco (2005).

A principal característica do óleo diesel é o Índice de Cetano (IC) que expressa a sua facilidade ou não de entrar em ignição. Quanto maior o IC mais fácil será essa ignição, o que facilita a partida do motor. O IC do óleo diesel é especificado pela ANP em no mínimo 45 cetanos (IC adequado: 40 – 60) (TEXACO, 2005).

A viscosidade deve ser tal que garanta um bom funcionamento do sistema de injeção dos motores. O teor de enxofre presente no óleo diesel deve ser controlado para evitar a corrosão e a formação de óxidos de enxofre, os quais são compostos altamente poluentes. O enxofre em contato com a umidade do ar, forma ácido sulfúrico responsável pela chuva ácida. O teor de impurezas: água, sedimentos e

cinzas, também devem ser controlados para manter a eficiência do combustível (TEXACO, 2005).

2.2.2 Biodiesel

O Biodiesel é um combustível biodegradável derivado de fontes renováveis, que pode ser obtido por diferentes processos tais como o craqueamento, a esterificação ou pela transesterificação. Pode ser produzido a partir de gorduras animais ou de óleos vegetais, existindo dezenas de espécies vegetais no Brasil que podem ser utilizadas, tais como mamona, dendê (palma), girassol, babaçu, amendoim, pinhão manso e soja, dentre outras (KIMURA, 2010)

O Biodiesel substitui total ou parcialmente o óleo diesel de petróleo em motores ciclo-diesel automotivos (de caminhões, tratores, camionetas, automóveis) ou estacionários (geradores de eletricidade, calor). Pode ser usado puro ou misturado ao diesel em diversas proporções. A mistura de 2% de biodiesel ao diesel de petróleo é chamada de B2 e assim sucessivamente, até o biodiesel puro, denominado B100 (KIMURA, 2010)

Segundo a Lei nº 11.097, de 13 de janeiro de 2005, biodiesel é um “biocombustível derivado de biomassa renovável para uso em motores a combustão interna com ignição por compressão ou, conforme regulamento, para geração de outro tipo de energia, que possa substituir parcial ou totalmente combustíveis de origem fóssil” (KIMURA, 2010).

No mercado de biocombustíveis adotou-se a expressão BXX onde B significa *Blend* e XX é a quantidade de biocombustível misturado ao óleo Diesel, sendo assim, a sigla B3 significa 3% de Biodiesel puro (B100), oriundo de fontes renováveis e 97% de óleo Diesel derivado do petróleo (KIMURA, 2010).

A transesterificação é o processo mais utilizado atualmente para a produção de biodiesel. Consiste numa reação química dos óleos vegetais ou gorduras animais com o álcool comum (etanol) ou o metanol, estimulada por um catalisador, da qual também se extrai a glicerina, produto com aplicações diversas na indústria química (KIMURA, 2010).

Além da glicerina, a cadeia produtiva do biodiesel gera uma série de outros co-produtos (torta, farelo etc.) que podem agregar valor e se constituir em outras fontes de renda importantes para os produtores. Por ser um combustível não

poluente traz grandes benefícios para o meio ambiente. A emissão de CO₂, um dos principais gases causadores do efeito estufa, é reduzida em 7% na utilização de B5, 9% na utilização de B20 e 46% no caso do uso de Biodiesel puro (B100). As emissões de materiais particulados e fuligens são reduzidas em até 68% e há queda de 36% dos hidrocarbonetos não queimados. Extremamente significativa também é a redução nos gases de enxofre (causadores da chuva ácida), de 17% para o B5, 25% para o B20 e 100% para o Biodiesel puro, uma vez que, diferentemente do Diesel de petróleo, o Biodiesel não contém enxofre (MB DO BRASIL, 2008 apud KIMURA, 2010).

Mas o biodiesel apresenta algumas desvantagens, por exemplo a cristalização em baixas temperaturas, devido ao seu aumento de viscosidade significativo. Assim como no Diesel, podem ocorrer formações de pequenos cristais, que se unem e impedem o bom funcionamento do motor. Porém, existem diversas precauções que podem ser tomadas para contornar este problema (KIMURA, 2010).

Outro fator importante são as emissões de NO_x. De todas as partículas prejudiciais esta é a única que com Biodiesel apresenta ligeiro aumento. O óxido de nitrogênio pode aumentar até 15% no uso de B100 (KIMURA, 2010).

Economicamente o biodiesel puro, B100, é inviável.

2.2.3 Comparação entre diesel e biodiesel

Através de uma parceria da Fundação Araucária com o Tecpar (Executor), o Lactec (Co-executor) e a Secretaria de Estado da Ciência, Tecnologia e Ensino Superior do Paraná- SETI (Interveniente) foram realizados testes que compararam o uso de diesel e biodiesel em motores. Os resultados mostraram que o desempenho do B100 em relação ao diesel é inferior quando comparado o torque e a potência. No entanto realizando uma correção na injeção do motor abastecido com biodiesel é possível obter a mesma potência para os dois combustíveis (KIMURA, 2010).

Em relação às emissões ficou comprovada uma redução nos níveis de CO, HC e fuligem quando se utiliza o B100 vegetal, o que atende aos objetivos buscados pelas novas políticas ambientalistas de reduzir a poluição gerada pelos motores. No entanto houve um aumento na emissão do NO_x, o que não pode ser desprezado, mas sim analisado mais especificamente para que então se obtenha a mistura de

combustíveis que produzam a menor quantidade de resíduos possíveis (KIMURA, 2010).

A Tabela 1 proporciona a comparação das principais características entre o Biodiesel e o Diesel comum. Importante ressaltar que no Biodiesel há ausência dos níveis de enxofre e uma biodegradabilidade muito alta quando comparada com o Diesel comum.

O ponto de fulgor do Diesel é inferior ao do Biodiesel.

Tabela 1 - Quadro comparativo das propriedades do Diesel com o Biodiesel.

Propriedades	Biodiesel	Diesel
Cetanagem	51-62	44-47
Lubricidade	Maior que o Diesel	Baixo fator de lubricidade
Biodegradabilidade	Alta	Muito baixa
Toxicidade	Não tóxico	Altamente tóxico
Oxigênio	11% de oxigênio livre	Muito baixo
Aromáticos	Não possui	18-22%
Enxofre	Nenhum	0.05%
Ponto de névoa	Próximo ao do Diesel	
Contaminação por derramamento	Baixo	Muito alto
Ponto de ignição	148-204 °C	52°C
Compatibilidade com outros materiais	Degradação natural de polímeros butílicos	Efeito não natural em polímeros butílicos
Transferência e estocagem	Nenhum risco em nenhuma das atividades	Altamente perigoso
Valor calorífico	2 % maior que o Diesel	
Suprimento	Renovável	Não renovável
Combustível alternativo	Sim	Não
Processo produtivo	Reação química	Reação química e fracionamento
Composição química	Ésteres de alquila (metila, Etila)	Hidrocarbonetos

Fonte: Dabdoub (2006 apud KIMURA, 2010).

2.3 Pin on disk

Conforme o avanço da pesquisa sobre a interação de óleo e superfície, a abordagem experimental se torna cada vez mais necessária, visando o avanço do estudo da tribologia. Para a realização do estudo em laboratório, é necessário que se siga algumas regras:

- Entendimento e identificação das principais variáveis que afetam o desempenho do tribossistema, este composto pelos pares em contato e pelo lubrificante, como o carregamento mecânico (carga, velocidade, temperatura, dinâmica), os materiais e o acabamento superficial. Para isso, normalmente conta-se com a experiência e com resultados da literatura, estes em geral obtidos a partir de ensaios em tribômetros convencionais, como os do tipo pino-sobre-disco (MARU, 2003).
- Realização de ensaios em condições próximas do tribossistema real, ou ao menos considerando as variáveis de maior relevância. Este item leva a um problema de caráter econômico, pois os ensaios que possuem maior credibilidade são aqueles realizados em campo ou em sistemas cujas condições se aproximam quase que totalmente das condições reais. Tais tipos de ensaios envolvem custo alto e tempos longos, segundo Maru (2003).

PIN-ON-DISK é essencialmente um equipamento para se fazer testes de tribologia dos materiais, é usado frequentemente para analisar materiais de peças separadas ao invés de sistemas inteiros. Nos ensaios PIN-ON-DISK, são usados um pino e um disco simples para medir as características de atrito e desgaste do par de determinado material. A instalação geralmente prevê uma força constante ou variável dinamicamente de compressão sobre o pino para induzir um nível de estresse simulado que iria ocorrer em qualquer sistema real. Esse ensaio em testes de engenharia em geral normalmente fornece um movimento recíproco linear ou movimento curvilíneo, onde um disco é girado em um pino fixo com alguma compressão aplicada. A resistência à força sobre o pino, é medida assim como a força de compressão para que se possa estimar o coeficiente de atrito. O mecanismo de funcionamento desse equipamento consiste em um pino fixo que é posicionado sobre um disco de material diferente do pino. O disco entra em movimento, geralmente rotacional, e o contato entre as duas peças provoca atrito consistindo em um desgaste dos materiais. Sobre o pino, tem-se uma carga para

forçar esse contato. A velocidade pode variar de acordo com o interesse do operador. É um equipamento de simulação de movimento, pois variando a carga, a velocidade, o diâmetro da faixa de desgaste e a lubrificação, pode-se simular a situação desejada (MARU, 2003).

Equipamentos PIN-ON-DISK tem a função básica de simular o atrito entre diferentes tipos de materiais. Através de ensaios, pode-se obter um desgaste de materiais e saber qual a resistência de um material em relação ao outro. É possível analisar a força de atrito de acordo com a carga usada verticalmente sobre o pino, pode-se simular várias velocidades de operações de acordo com o motor acoplado no seu equipamento e pode-se realizar esses ensaios sob a ação de lubrificantes ou à seco (MARU, 2003).

É um equipamento onde há muita flexibilidade de operações, pois existem muitos parâmetros que podem ser variados e assim obter a situação esperada pelo operador. Esse teste é um método rápido e fácil de obter-se um atrito cinético e medir o desgaste. Com os instrumentos certos, é possível medir o atrito entre o contato pino-disco, e também a rugosidade das peças antes e depois de ensaiadas. Existem mais variedades de equipamentos pin-on-disk, onde o disco é comprimido por uma esfera ao invés do pino, e geralmente essa esfera tem uma dureza maior que o disco (podendo ser ao contrário também), porém sempre ela se mantém estacionária e quem fica em movimento é o disco (MARU, 2003).

Em um equipamento PIN-ON-DISK, o processo de desgaste é comumente caracterizado pela taxa de desgaste que é determinada pelo volume do material desgastado a partir da superfície de atrito durante o contato entre os materiais. Essa taxa é um valor adimensional e é influenciada por diferentes fatores, condicionalmente dividido em fatores externos (velocidade de deslizamento, carga e temperatura), e também os fatores relativos aos materiais de contato e lubrificantes. Entre a variedade de fatores, dois são normalmente identificados: pressão e velocidade de deslizamento (MEZRIN, 2009).

2.4 Motor de combustão interna

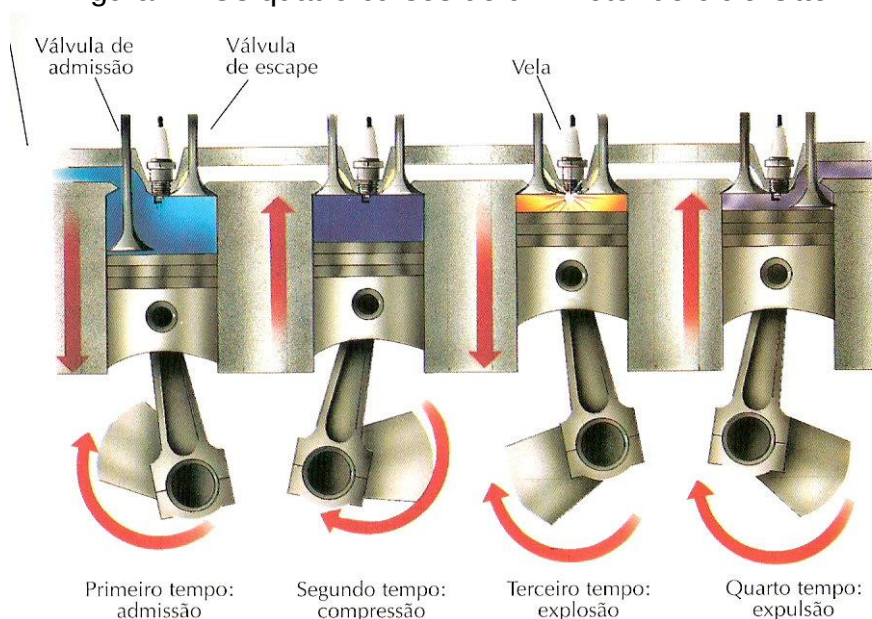
Definem-se motores térmicos como máquinas que têm por objetivo transformar energia calorífica em energia mecânica útil. Do ponto de vista termodinâmico, define-se motor térmico como um sistema que opera segundo um

ciclo, realizando um trabalho líquido positivo e trocando um calor líquido positivo, ou seja, uma máquina térmica pode ser definida como um dispositivo que, operando sob um ciclo termodinâmico, realiza trabalho líquido positivo a custa de transferência de calor de um reservatório térmico em temperatura elevada para um reservatório térmico em temperatura baixa (VAN WYLEN et al., 1985).

Os motores de combustão interna são classificados de acordo com o modo de queima do combustível em motores com ignição por centelha e motores com ignição por compressão. Estes últimos também são conhecidos por motores diesel. Motores movidos a gasolina ou a álcool são exemplos de motores com ignição por centelha. No caso de motores com ignição por centelha, a queima de combustível é iniciada com uma centelha fornecida pela vela de ignição, que é um componente instalado na superfície superior do cilindro, na parte chamada cabeçote do cilindro. Já no caso de motor a diesel a ignição é iniciada pela injeção de combustível no cilindro através de bicos injetores. A combustão em motores diesel se dá de maneira espontânea, estimulada por elevadas pressão e temperatura da mistura ar/combustível no cilindro (MALPICA, 2007).

Os motores também podem ser classificados como de quatro cursos ou dois cursos. Durante seu funcionamento, um motor continuamente admite uma quantidade de ar e combustível, comprime e queima a mistura e a deixa expandir antes de expulsá-la do cilindro. Quando este ciclo é feito ao tempo em que o pistão executa quatro movimentos, dois para cima e dois para baixo, o motor é chamado de quatro cursos. Quando o pistão realiza somente dois movimentos durante o ciclo, um para cima e um para baixo, o motor é chamado de dois cursos (PRESTES, 2009).

Figura 2 - Os quatro cursos de um motor de ciclo Otto.



Fonte: Prestes (2009).

Rudolf Diesel, em Augsburg, Alemanha em 10 de agosto de 1893 foi o responsável pela criação do primeiro modelo de motor a diesel que funcionou de forma eficiente. Alguns anos depois, o motor foi apresentado oficialmente na Feira Mundial de Paris, França, em 1898. O combustível então utilizado era o óleo de amendoim, um tipo de biocombustível obtido pelo processo de transesterificação (PRESTES, 2009).

Os primeiros motores tipo diesel eram de injeção indireta. Tais motores eram alimentados por petróleo filtrado, óleos vegetais e até mesmo por óleos de peixe. Entre 1911 e 1912, Rudolf Diesel fez a seguinte afirmação:

O motor a diesel pode ser alimentado por óleos vegetais, e ajudará no desenvolvimento agrário dos países que vierem a utilizá-lo. O uso de óleos vegetais como combustível pode parecer insignificante hoje em dia, mas com o tempo irão se tornar tão importante quanto o petróleo e o carvão são atualmente (PRESTES, 2009).

Após a morte de Rudolf Diesel, a indústria do petróleo criou um tipo de óleo que denominou de "Óleo Diesel" que, por ser mais barato que os demais combustíveis, passou a ser largamente utilizado. Foi esquecido, desta forma, o princípio básico que levou à sua invenção, ou seja, um motor que funcionasse com óleo vegetal e que pudesse ajudar de forma substancial no desenvolvimento da agricultura dos diferentes países. A abundância de petróleo aliada aos baixos custos

dos seus derivados fez com que o uso dos óleos vegetais caísse no esquecimento. Advindo dos conflitos entre países e o efeito estufa foram elementos que obrigaram a implantação do desenvolvimento auto-sustentável exigido pelos ambientalistas. Assim retornam as ideias de produção de óleo vegetal para ser utilizado em motores, de Rudolf Diesel (PRESTES, 2009).

Em motores de combustão interna todas as peças possuem uma vida útil previamente estabelecida, com maior ou menor duração, de acordo com a função específica a elas atribuída. Funções, que em condições normais de funcionamento, atendem as expectativas previstas. Pela análise do óleo podem-se monitorar as condições destas peças. A análise dos óleos permite identificar os primeiros sintomas de desgaste de um componente. A identificação é feita a partir do estudo da quantidade de partículas, tamanho, forma e composição das mesmas, presentes nas amostras de lubrificante, que fornecerão informações precisas sobre as condições das superfícies em movimento sem a necessidade de se desmontar o conjunto a qual estas partes pertencem. Tais partículas sólidas são geradas pelo atrito dinâmico entre as peças em contato no conjunto. De acordo com o estudo destas partículas podem-se relacionar as situações de desgaste do conjunto e atribuí-las a condições químicas e físicas (MALPICA, 2007).

2.5 Lubrificação

Finas camadas de gás, líquidos e sólidos são interpostas entre duas superfícies, a fim de melhorar a suavidade do movimento de uma superfície sobre a outra e evitar danos, este processo é denominado de lubrificação. Estas camadas de material separam corpos sólidos em contato e são normalmente muito finas e muitas vezes difícil de observar a olho nú. Em geral, a espessura destes filmes vão de 1 a 100 [µm], embora filmes mais finos e mais grossos também possam ser encontrados (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2005).

Não existem restrições quanto ao tipo de material utilizado para formar a película de lubrificação, podendo ser utilizado líquido, gás e sólidos, mas tem-se que levar em conta que cada tipo de material influencia nos limites de eficácia do filme. Por exemplo, um filme gasoso é adequado para contatos sobre baixo estresse, enquanto películas sólidas são geralmente aplicadas quando há um deslocamento à baixa velocidade. A análise detalhada dos filmes gasosos ou líquidos é geralmente

denominada de "lubrificação hidrodinâmica" enquanto a lubrificação por sólidos é denominada de "lubrificação sólida".

Uma forma especial de lubrificação hidrodinâmica envolvendo uma interação física entre os corpos em contato e o líquido lubrificante é chamado de "lubrificação elastohidrodinâmica" e é de grande importância prática. Outra forma de lubrificação que envolve as interações químicas entre os corpos em contato e o lubrificante líquido, e é chamado de "Lubrificação sob Extrema Pressão" (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2005).

2.6 Tipos de lubrificação

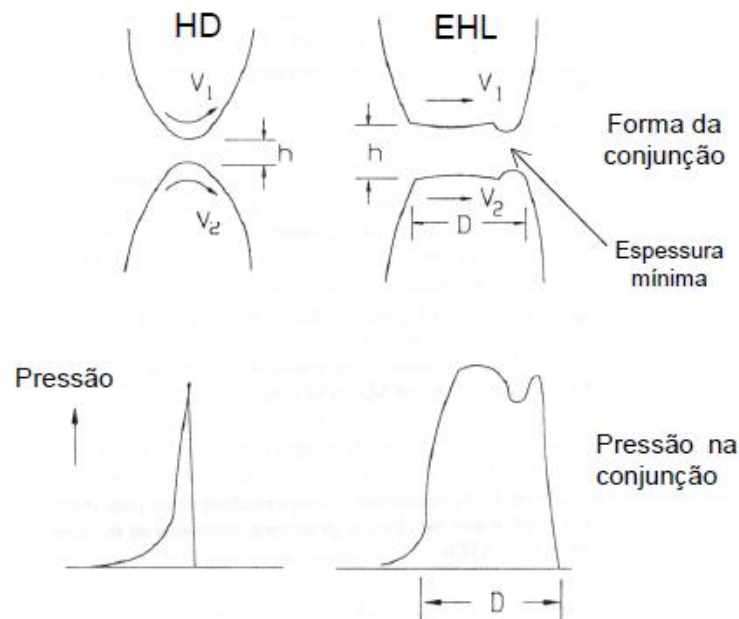
Bayer (1994 apud MARU, 2003) diz que há dois tipos de lubrificações, a chamada lubrificação hidrodinâmica (HD), para o caso em que os corpos deslizam em um filme sem sofrerem deformação, e a lubrificação elastohidrodinâmica, quando, ao ser formado o filme na interface, os corpos em contato sofrem deformação elástica.

Tanto a lubrificação hidrodinâmica como a elastohidrodinâmica são conhecidas como lubrificação fluida.

Sabe-se que a separação entre as superfícies é a principal maneira para evitar a adesão, e o grau de separação está diretamente relacionado com a velocidade relativa entre as duas superfícies e a sua geometria. Uma vez ocorrido o efeito cunha, quanto maior a velocidade e mais planas as superfícies, mais espesso será o filme formado (MARU, 2003).

Bayer (1994) mostra na figura 3 as distribuições de pressão e as modificações geométricas dos corpos para as situações de lubrificação hidrodinâmica e elastohidrodinâmica para duas esferas em contato deslizante.

Figura 3 - Diferenças no filme lubrificante da lubrificação hidrodinâmica e elastohidrodinâmica.



Fonte: Maru (2003 apud BAYER, 1994).

Segundo Maru (2003), Bayer desenvolveu uma série de equações capazes de aproximar um bom resultado para a espessura dos filmes lubrificantes para o processo de lubrificação hidrodinâmica e elastohidrodinâmica. Estas equações podem ser vistas na equação 1 e 2, respectivamente para a lubrificação hidrodinâmica e elastohidrodinâmica.

$$h_{HD} = 4,9 \cdot R \cdot \left(\frac{\eta \cdot V}{W'} \right) \quad (1)$$

$$h_{EHL} = 2,65 \cdot \alpha^{0,54} \cdot (\eta_0 \cdot V)^{0,7} \cdot R^{0,43} \cdot W'^{-0,13} \cdot E^{-0,03} \quad (2)$$

Onde:

h_{HD} é a espessura do filme hidrodinâmico;

h_{EHL} é a espessura do filme elastohidrodinâmico;

W' é a carga normal por unidade de comprimento [N/m];

R é o raio equivalente, que é feito pelas médias das superfícies em contato;

V é a velocidade relativa;

η é a viscosidade do fluido [Pa.s];

α é o coeficiente;

E' é o módulo elástico reduzido do contato de Hertz [Pa];

η_0 é a viscosidade à pressão atmosférica [cP] ou [$10^{-3} Pa.s$].

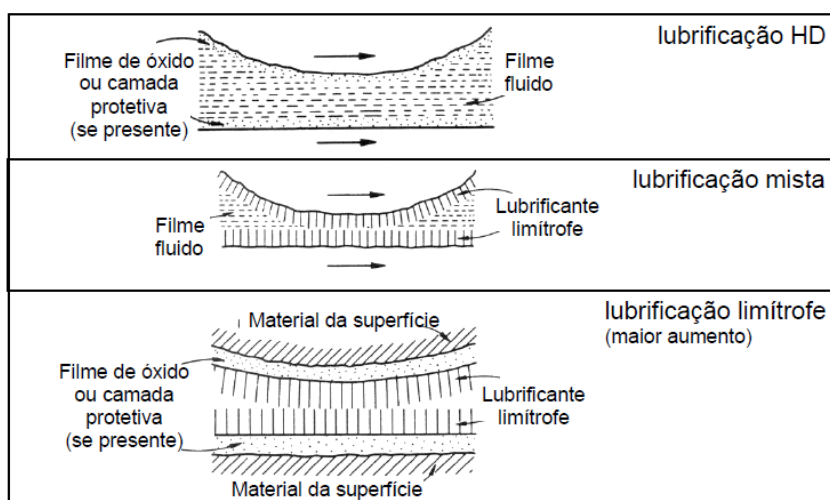
Maru (2003) cita Bayer (1994) que diz que no regime limítrofe, as maneiras por meio das quais o fluido lubrificante age contra a adesão são aquelas que ocorrem através da formação de camadas adsorvidas fisicamente e quimicamente. Nesse caso, não há uma sensibilidade direta aos parâmetros geométricos e de velocidade. A formação, resistência e tenacidade de tais filmes estão relacionadas principalmente com a natureza química das superfícies e do lubrificante.

Especialmente na lubrificação em condições extremas de operação, as características do lubrificante limítrofe são um fator preponderante nas respostas de atrito e de desgaste.

Uma questão acerca da lubrificação fluida e limítrofe é quanto ao estabelecimento de uma espessura de filme limite para a ocorrência da fluida ou da limítrofe, já que é possível encontrar filmes elastohidrodinâmicos com espessuras com até ordem de nanômetros e as espessuras dos filmes limítrofes podem também ser da ordem de nanômetros, dependendo da substância lubrificante (MARU, 2003).

A lubrificação mista é relacionada à situação em que ocorrem ambos os tipos de lubrificação, fluida e limítrofe (BAYER, 1994).

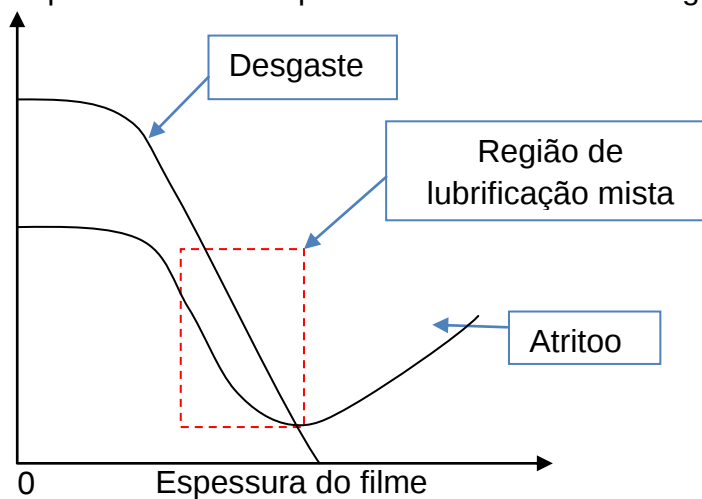
Figura 4 - Ilustração de tipos de filmes formados durante a lubrificação.



Fonte: Neale (1997 apud MARU, 2003).

Em sistemas lubrificados, os fenômenos da interface que afetam o atrito e, consequentemente o desgaste, são relacionados à espessura do filme de óleo. Para tanto Blau (1994) apresentou um diagrama esquemático no qual relacionou o desgaste, o atrito e a espessura do filme de óleo, como mostrado na figura 5.

Figura 5 - Diagrama que relaciona a espessura do óleo com o desgaste e atrito.

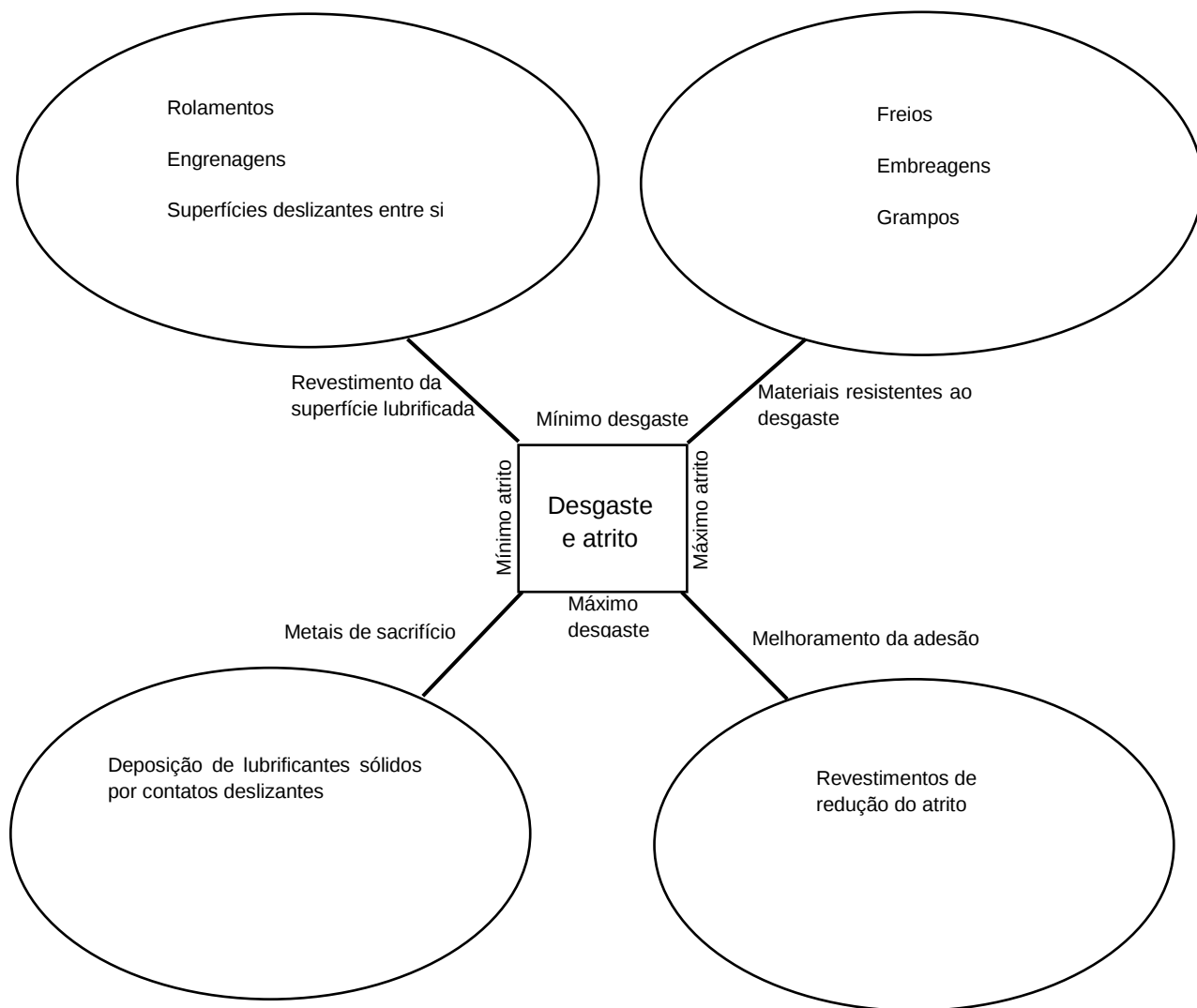


Fonte: Modificada de Blau (1994).

2.7 Tribologia

O trabalho da tribologia é estudar os efeitos da lubrificação, do atrito e do desgaste, sendo assim é proposto por Stachowiak et al.(2005) um modelo de uso prático da tribologia, exposto na figura 6.

Figura 6 - Modelo Tribológico.



Fonte: Stachowiak e Batchelor (2005).

2.8 Desgaste

Segundo Stachowiak e Batchelor (2005) a falha do filme lubrificante compromete o movimento relativo entre os corpos sólidos, provocando graves danos às superfícies que estão em contato. Quando ocorre uma falha no filme lubrificante o que acontece é chamado de desgaste severo. O desgaste nestas circunstâncias é o resultado da adesão entre os corpos em contato e é denominado de "desgaste adesivo". Quando os filmes em formas intermediárias são parcialmente eficazes, formas mais brandas de desgaste ocorrem, e estas são muitas vezes iniciadas por

fenômenos de fadiga devido à esforços repetitivos, tanto no deslizamento quanto no rolamento.

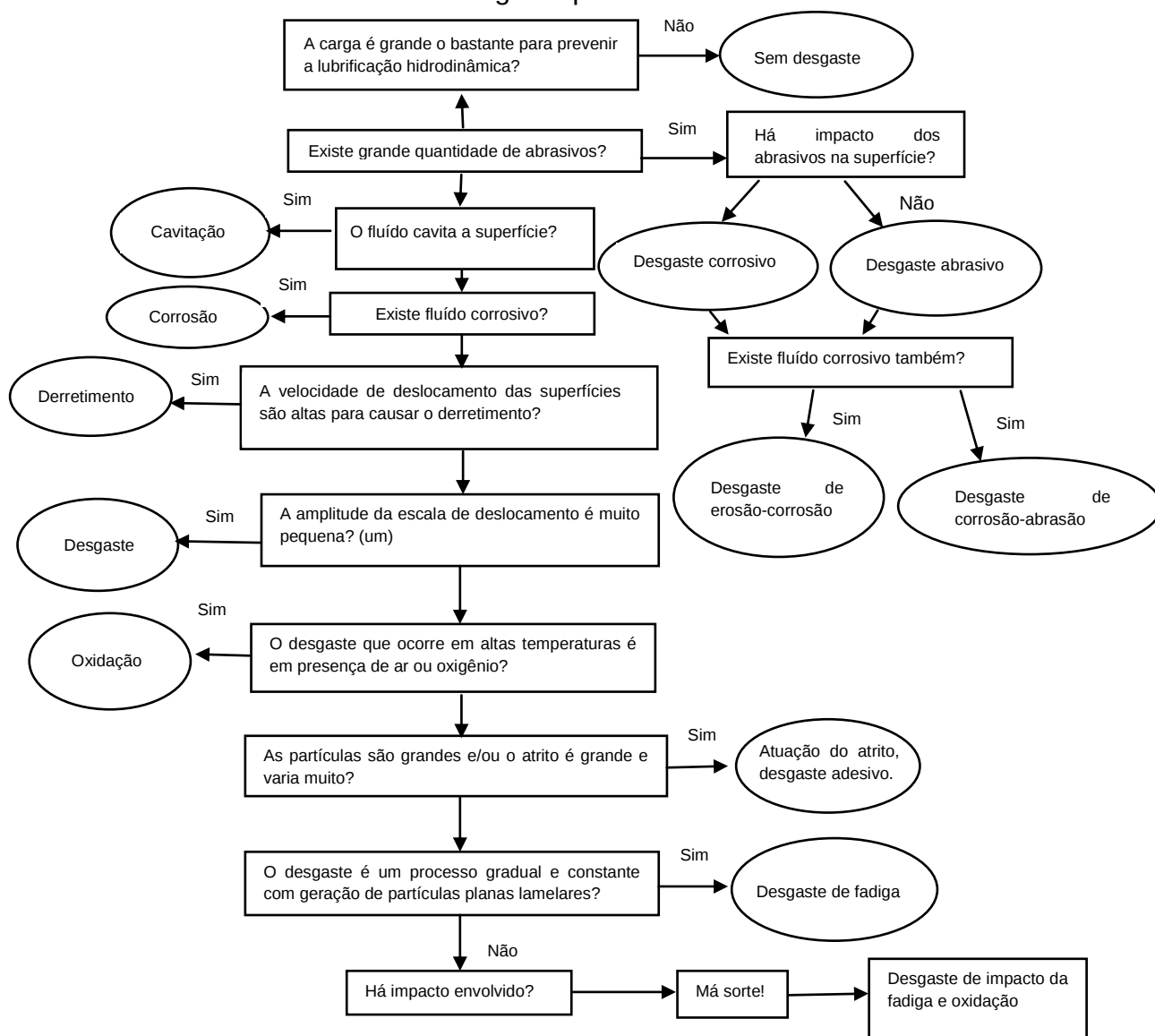
Estas formas mais brandas de desgaste podem ser chamadas de "desgaste por fadiga". Por outro lado, se o material do filme é constituído por partículas duras ou simplesmente escoa em um corpo apoiado a um outro corpo, aparece um tipo de desgaste, o qual ocorre muito rapidamente, conhecido como "desgaste por abrasão". Duas outras formas associadas ao desgaste são o "desgaste erosivo" (devido ao impacto de partículas) e o "desgaste por cavitação", que é causada pelo escoamento de líquidos à altas velocidades (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2005).

Em algumas situações práticas, o material do filme é formado também pelos ataques químicos dos produtos dos corpos em contato, se isso ocorrer pode haver falha na lubrificação, portanto o desgaste é praticamente inevitável. Esta forma de desgaste é conhecida como "desgaste corrosivo", por outro lado, quando o oxigênio atmosférico é o agente corrosivo ocorre o "desgaste oxidativo". Quando a amplitude de movimento entre os corpos em contato é restrita a alguns micrômetros, o material do filme de proteção é preso dentro do contato e pode, eventualmente, tornar-se destrutivo. Estas condições descritas podem resultar no "desgaste por atrito". Há também muitas outras formas ou mecanismos de desgaste. Quase toda forma de interação entre corpos sólidos irá causar algum tipo de desgaste (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2005).

O impacto repetitivo entre duas superfícies sólidas gera o "desgaste por impacto", outro tipo de desgaste é o "desgaste por fusão", que ocorre quando as cargas impostas aos corpos em contato e as velocidades são suficientemente elevadas para permitir que as superfícies dos sólidos derretam-se e se fundam. O "desgaste por difusão" ocorre quando há altas temperaturas na interface (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2005).

Futuramente será abordado cada tipo de desgaste, suas características e suas razões. Por agora, as condições que levam aos diferentes tipos de desgaste podem ser vistas no fluxograma mostrado na figura 7.

Figura 7 - Fluxograma demonstrativo da relação entre condições de operação e tipo de desgaste proveniente.



Fonte: Stachowiak e Batchelor (2005).

2.8.1 Desgaste adesivo

O desgaste adesivo é um dos mais comuns mecanismos de desgaste. Ocorre quando duas superfícies estão em contato e acontece o deslizamento à seco. Em uma primeira análise, observando-se as superfícies a olho nú, estas apresentam-se aparentemente uniformes e lisas, mas através de uma análise mais apurada através do microscópio, é possível observar-se que a superfície apresenta asperezas, exibindo também alguns picos. Superfícies em contatos se tocam apenas através das asperezas. Se a interface de contato entre estas elas tem força adesiva de

ligação suficientemente grande para resistir ao deslizamento relativo, uma grande quantidade de deformação plástica é introduzida na região de contato, resultando em partículas de desgaste em forma de "flocos" (KAYABA; KATO, 1981).

Às vezes, o desgaste forma partículas em forma "cunhas", o que pode resultar na formação de pontos de "pitting" ou na propagação de trincas pré-existentes a partir de micro-fissuras na região de contato. Quando a rachadura atinge a interface de contato, uma partícula de desgaste adesivo é formada e a transferência do contato adesivo é concluída. No processo de deslizamento repetido, estas partículas de desgaste podem ser destacadas e ficarem livres.

2.8.2 Desgaste abrasivo

Asperezas rígidas em uma superfície podem esfregar, arrancar, ou riscar o material da superfície em contato com uma superfície mais macia. Estas asperezas podem ser devidas a processos químicos, tal como oxidação ou devido aos efeitos da temperatura, formando uma precipitação de carbonetos. O desgaste erosivo é também, por vezes, classificado como uma forma de desgaste abrasivo. Alternativamente, pesquisadores, tais como Engel (1978) categorizaram erosão como uma forma de desgaste de impacto.

A condição necessária para que o desgaste abrasivo ocorra é o entrelaçamento de duas superfícies em contato. A face de contato inclinada /curvada é geralmente formada pela elevação de uma aspereza afiada dura contra uma superfície relativamente macia e achatada. Mas a ranhura abrasiva ocasionada pela aspereza mais dura e afiada só é possível quando a aspereza não é achatada ou fraturada durante o deslizamento entre os dois corpos, mas isso requer a consideração do critério de escoamento da aspereza na ação da ranhura, como dito por Srinivasan (2000).

Quando a aspereza dura é suficientemente forte para formar uma ranhura na face oposta durante o deslizamento, partículas de desgaste são formadas em três modos de desgaste abrasivo, (HOKKIRIGAWA; KATO, 1988), como citado a seguir:

- Modo de corte sobre baixo atrito, partículas na forma de longas fitas enroladas são formadas. Isto é análogo a um processo de usinagem em que o metal é removido com o lubrificante, oferecendo baixo atrito.

- No modo de formação de cunhas, uma partícula de desgaste em forma de cunha é formada na ponta do ranhuramento da aspereza.
- No modo de lavra, uma partícula de desgaste não é gerada por uma única passagem de deslizamento, e sim, apenas um sulco pouco profundo é formado.

2.8.3 Desgaste por Fadiga

O desgaste por fadiga em escala microscópica é associado com as asperezas dos contatos individuais. A falha ocorre devido à deformação repetida das asperezas dos corpos se esfregando. Neste processo, uma fissura se propaga através do material e pode juntar-se com outras fissuras de modo que isolam pedaços de material, que podem desprender-se para formar uma partícula de desgaste.

Segundo Srinivasan (2000), a localização da falha pode ser definida pela posição das tensões máximas de cisalhamento que, dependendo do coeficiente de atrito, encontra-se na superfície ou abaixo dela. As características da falha de desgaste causado por fadiga são pontos de "pitting" e descamação. A descamação é um caso grave de "pitting" e ocorre quando as fissuras são iniciadas por baixo da superfície.

2.8.4 Delaminação

Consiste na perda de metal sob a forma de flocos, causada pela formação e propagação de fissuras de fadiga subsuperficiais correndo paralelamente junto à superfície. A delaminação é por muitas vezes, classificada como um mecanismo de fadiga, uma vez que depende da propagação contínua de micro-fissuras subsuperficiais. Rachaduras podem iniciar o processo devido à acumulação de deslocamentos ou à formação de vazios em torno de inclusões no material. A inversão das tensões encontradas na subsuperfície durante o contato deslizante é considerado na maioria das vezes o responsável pela propagação das fissuras (SRINIVASAN, 2000).

Durante o contato de deslizamento, um incremento de danos no material é evidenciado a cada interação das asperezas. Eventualmente, quando as rachaduras das camadas subsuperficiais encontram fendas superficiais, uma folha fina de material (desgaste) será levantada na superfície.

2.8.5 Fratura de cisalhamento

Segundo Srinivasan (2000), a fratura de cisalhamento é um conceito relativamente novo em mecanismos de desgaste. Os produtos do desgaste tanto da delaminação quanto da fratura por cisalhamento serão finos e em formas de flocos. As marcas deixadas pelo desgaste também parecem idênticas. Mas há uma distinção entre a fratura de cisalhamento e a delaminação. O mecanismo de delaminação geralmente é considerado como um fenômeno de ruptura frágil, pelo qual rachaduras se propagam por baixo da superfície; enquanto a fratura de cisalhamento ocorre devido ao cisalhamento dúctil, causando grande deformação plástica perto da superfície.

2.8.6 Corrosão ou Oxidação

O desgaste corrosivo geralmente é resultado de reações químicas envolvendo os componentes que estão em contato. A oxidação, por exemplo, acontece na sua mais elevada taxa quando uma nova superfície é exposta ao ambiente ao redor e, subsequentemente, diminui em uma taxa parabólica (SRINIVASAN, 2000).

Se o produto de óxido não for removido, o filme de óxido formado irá proteger o material de futuros desgastes devido a oxidação. Os aços inoxidáveis, por exemplo, prontamente formam tais películas de proteção. O deslizamento relativo, numa situação de desgaste normalmente irá remover a película de óxido. Por outro lado, em alguns casos uma camada de óxido muito dura é formada na superfície, sendo assim, esta superfície ajuda a diminuir o desgaste. Mas se a camada dura é rompida, o desgaste também pode acelerar devido ao mecanismo de três corpos em ação e suas respectivas forças cisalhantes (SRINIVASAN, 2000).

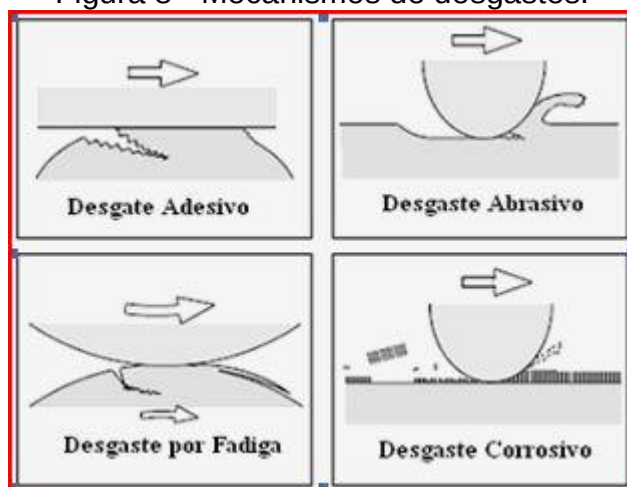
2.8.7 Desgaste por atrito

Segundo Srinivasan (2000), esta forma de desgaste é comum quando dois componentes em contato, sofrem um movimento oscilatório relativo de amplitudes muito pequenas (100µm - 250 µm). Na verdade, é uma combinação de vários mecanismos de desgaste, incluindo a abrasão, adesão, corrosão e fadiga.

O desgaste por atrito geralmente é iniciado pelo desgaste abrasivo ou adesivo e subsequentemente quando as partículas de desgaste são óxidos, um mecanismo de desgaste provocado pelo terceiro componente é ativado (WATERHOUSE; TAYLOR, 1974).

A figura 8 mostra como é o mecanismo de desgaste para o desgaste adesivo, abrasivo, por fadiga e corrosivo, os autores Kato e Adachi (2001) esclarecem como é decorrido o processo para a geração de partículas, conforme figura 8.

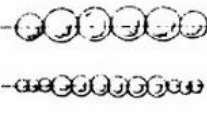
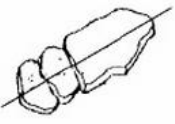
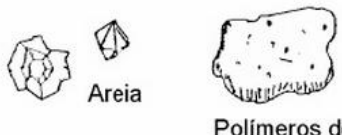
Figura 8 - Mecanismos de desgastes.



Fonte: Kato e Adachi (2001).

A figura 9 ilustra os formatos e dimensões das partículas de desgaste, deste modo, analisando-se a forma das partículas encontradas na amostra é possível descobrir a causa do desgaste.

Figura 9 - Classificação das partículas de desgaste.

1	ESFOLIAÇÃO	2	CORTE POR ABRASÃO
 * Escamas * Superfície lisa * 0,5 ~ 5µm		 * Cavacos * Existência de areia * 10 ~ 100µm	
3	FADIGA (rolamento e engrenagem)	4	ARRASTAMENTO (engrenagens)
 * Esferas * ~ Regulares * ~ 3µm		 * Superfície rugosa * Coloração por temperatura * >20µm	
5	DESGASTE SEVERO POR DESLIZAMENTO	6	PARTÍCULAS DIVERSAS
 * Estrias * Corte reto * > 20µm		 Areia Polímeros de fricção	

Fonte: Baroni (2004).

A tabela 2 sugere a importância do desgaste em relação ao formato e tamanho das partículas analisadas, deste modo sabe-se o tempo de vida que a peça ainda tem, ou seja, se é necessário qualquer manutenção.

Tabela 2 - Morfologia das partículas e modo de desgaste.

MORFOLOGIA DAS PARTÍCULAS E MODO DE DESGASTE		
FORMA DAS PARTÍCULAS	TIPO DE DESGASTE	IMPORTÂNCIA DO DESGASTE
Pequenas plaquetas (0,3 a 5 µm)	Desgaste de adesão	Desgaste anormal
Grandes plaquetas (5 a 150 µm)	Atrito	Desgaste perigoso
Escamas (10 µm a 1 mm)	Escamação	Desgaste perigoso
Lascas enroladas ou encurvadas	Abrasão	Grave, sobretudo se as lascas forem numerosas
Esferas plásticas	Depósito de aditivos	Ocorrência grave
Esferas metálicas pequenas (1 a 5 µm)	Fadiga dos rolamentos	Ocorrência grave
Esferas metálicas grandes (> 10 µm)	Cavitação – erosão	Ocorrência grave
Magmas, aglomerados (2 a 150 µm)	Corrosão – oxidação	Ocorrência grave

Fonte: Arato Jr. (2004).

Por fim, para um melhor entendimento dos mecanismos de desgaste descritos nesta seção até aqui, é mostrado na Figura 10, a relação entre as propriedades dos materiais e possíveis tipos de desgaste a eles provenientes:

Figura 10 - Relação entre mecanismos de desgaste e propriedades dos materiais.

Propriedades Críticas do material	Mecanismos de Desgaste							
	Abrasão	Erosão	Cavitação	Corrosão	Desgaste	Adesão	Derretimento	Fadiga
Dureza	✓	✓	○	○	○	✓	○	○
Resistência	○	✓	✓	○	○	○	○	✓
Resistência à fadiga	✓	✓	✓	○	✓	○	○	✓
Inerte	○	○	○	✓	✓	○	○	○
Alto ponto de derretimento	○	○	○	○	○	✓	✓	○
Microestrutura heterogênea	✓	○	○	✖	○	✓	○	○
Caráter não metálico	○	○	○	✓	○	✓	○	○

✓ Importante; ○ Médio; ✖ Desfavorável

Fonte: Stachowiak e Batchelor (2005).

2.9 Modelagem de desgaste

Archard (1953) propôs um modelo simples que relaciona o volume desgastado perdido "Q", com a força de contato normal "W" e a dureza do material "H", conforme a equação 3:

$$Q = (K.W)/H \quad (3)$$

Onde K é o coeficiente de desgaste, e é definida como uma constante de proporcionalidade adimensional e pode variar de 10^{-1} a até 10^{-10} . Este modelo de desgaste é amplamente utilizado para o cálculo de desgaste devido à sua simplicidade. Burwell et al. (1952) observaram um aumento significativo na taxa de

desgaste quando a tensão de contato nominal ultrapassa cerca de um terço da resistência ao escoamento do material menos duro.

Para a modelagem do desgaste lubrificado, segundo o modelo de Archad, o desgaste é proporcional à distância e à carga imposta e inversamente proporcional à dureza "H" do material. O coeficiente "K" varia em uma faixa diferente agora também. Portanto o volume do desgaste "Q" é dado pela equação 4 mostrada abaixo:

$$Q = K.W.\Delta S \quad (4)$$

Onde:

Q é volume de desgaste [mm³];

K é coeficiente de desgaste [mm³ / (N.m)];

H é a dureza do material menos duro do par [MPa];

W é a carga normal [N];

ΔS é a distância percorrida [m].

Em uma situação de deslizamento lubrificado, o coeficiente adimensional de desgaste, **K**, assume valores que são significativamente menores (da ordem de 10^{-13} a 10^{-6} , dependendo do regime de lubrificação) (HUTCHINGS, 1992 apud MARU, 2003).

Para uma aplicação ativa da previsão de desgaste, existe o estudo da mecânica de contato, que fornece informações úteis sobre o estado das tensões perto da superfície em corpos deslizantes. Condições de contorno foram desenvolvidas para a teoria de contato circular na ausência de fricção para deslizamento, estas condições foram estabelecidas por Mindlin (1949). Ele assumiu que a tensão de cisalhamento em toda a área de contato é proporcional à tensão normal dado pelo coeficiente de atrito entre os corpos envolvidos. Campos de tensão abaixo dos corpos deslizantes foram determinadas por Poritsky (1950), Hamilton e Goodman (1966). Estas relações descrevem o campo de tensão elástica, que pode ser combinada com critérios de falha para determinar o local onde a plasticidade irá ocorrer primeiro, segundo Srinivasan (2000).

2.9.1 Método de Elementos Finitos para a previsão de desgaste

Uma forma de cálculo numérico que pode ser utilizado para a previsão do desgaste é o método de elementos finitos. Este método é amplamente empregado para fazer análises de equações diferenciais parciais e é utilizado na maioria das vezes para fazer cálculos em:

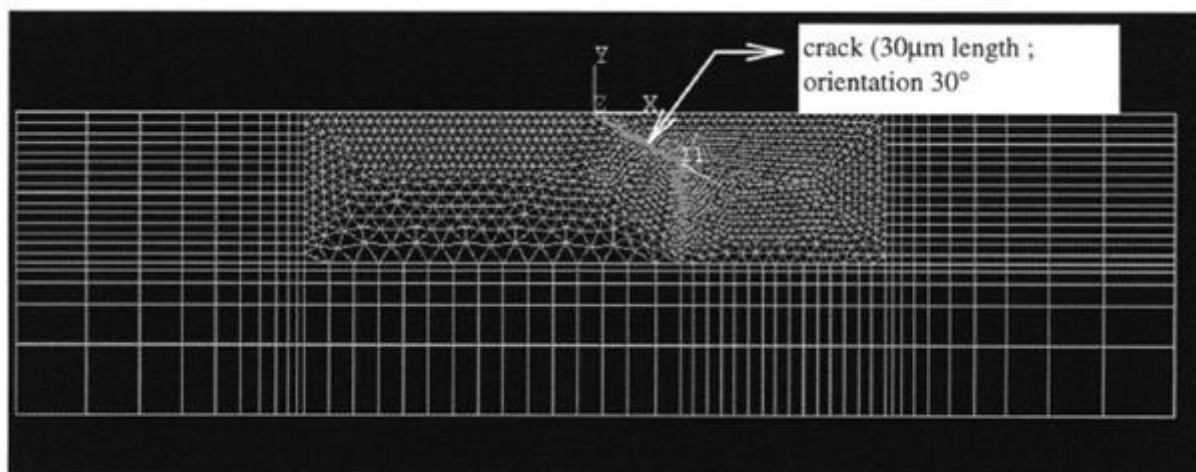
- Mecânica estrutural;
- Mecânica dos fluidos;
- Eletromagnetismo.

Com o avanço da ferramenta ao longo dos anos, este método também começou a ser empregado para antever a formação de desgaste. Desta forma, começou a ser aplicado no estudo de contato entre corpos, sendo que há uma grande dificuldade com os parâmetros e cálculos das equações analíticas.

Houve muitas tentativas de se calcular analiticamente as respostas das equações dos corpos em contato. Ham et al. (1988) utilizaram um modelo de elemento finito modificado para calcular as tensões e as deformações produzidas pela repetição do contato bi-dimensional do rolamento deslizante. Mais tarde, foi utilizado um modelo de elementos finitos para comparar as tensões e deformações de um aço endurecido, segundo Srinivasan (2000).

Srinivasan (2000 apud OHAME; TSUKIZOE, 1980) e Ohame (1986) que utilizaram o método de elementos finitos para simular a nucleação de vazios e a propagação de trincas para obter a formação de partículas, em seus estudos em alumínio puro e em uma placa de cobre puro em contato. Eles usaram elementos triangulares de três nós para representar uma célula deslocamento (0,5 μm) e variaram o tamanho do elemento, aumentando a profundidade da superfície de contato em (1 μm). A representação dos elementos, e a falha proveniente do desgaste podem ser vista na figura 11.

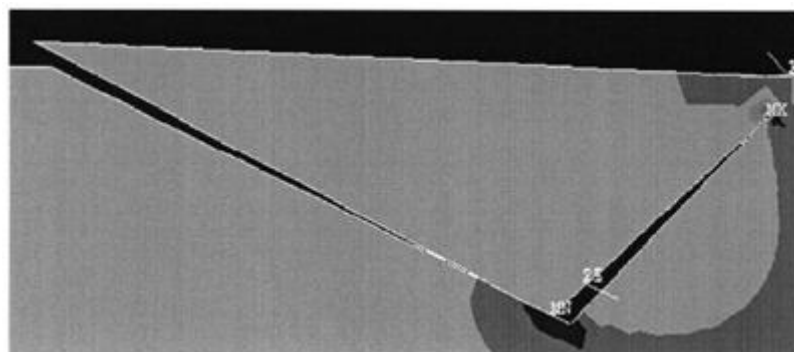
Figura 11 - Malha feita por elementos finitos para previsão de desgaste.



Fonte: Srinivasan (2000).

A figura 12 mostra as regiões que estão propensas a ter uma maior energia da força cisalhante. As áreas mais escuras sofrem com uma maior tensão cisalhante, e assim degradando até que fiquem isentas destas tensões. Este processo de análise é feito em elementos finitos e evidencia o início da formação da trinca, o que quando encontra outra trinca provoca a formação de partículas de desgaste que ficam suspensas no óleo lubrificante.

Figura 12 - Diagrama de tensões cisalhantes e início do processo de formação de trincas.



Fonte: Srinivasan (2000).

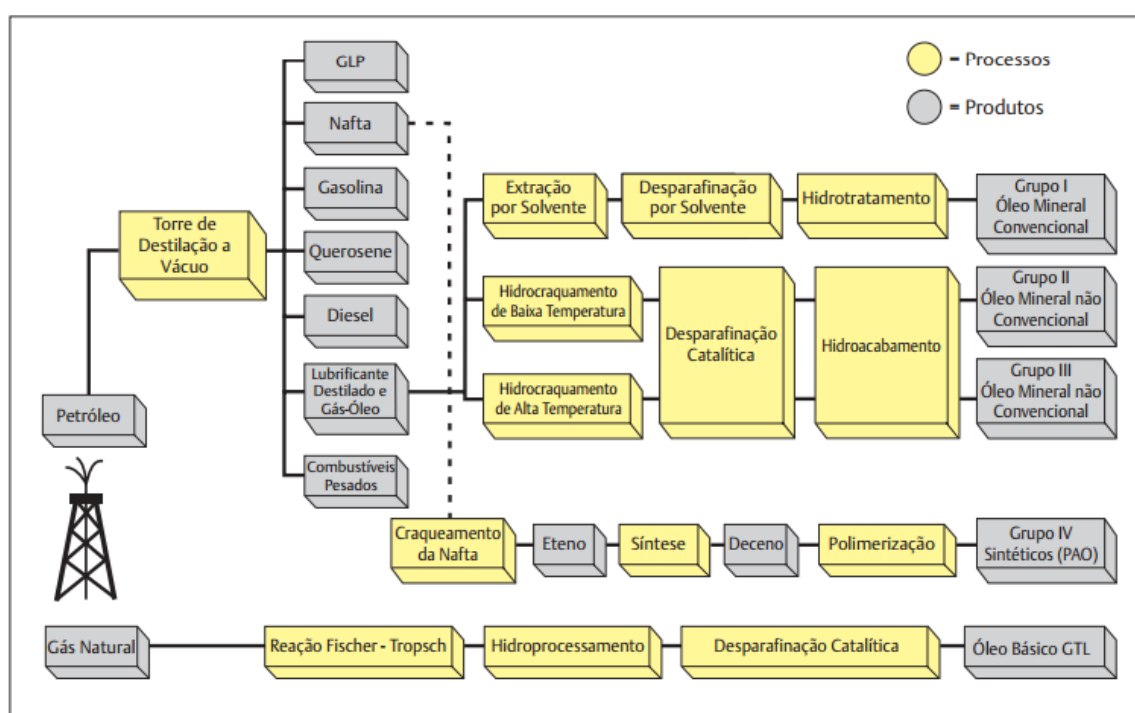
2.10 Composição dos óleos lubrificantes

Óleos lubrificantes geralmente são compostos por 95% de óleo mineral base e 5% de aditivos. Há três fontes de óleos de base, apresentando propriedades físicas e químicas diferentes uns dos outros (TEXACO, 2005).

- Biológicos: Quando se há a necessidade de evitar contaminação. Podem ser de origem vegetal e animal.
- Mineral: Provenientes do petróleo. Mais comuns do que o anterior e usado na indústria em geral.
- Sintéticos: São artificiais e desenvolvidos em laboratório.

Para a obtenção dos óleos básicos é preciso que haja o refino no petróleo bruto, este processo é feito nas refinarias e uma quantidade bem abrangente de subprodutos do petróleo é obtida. Depois de obtidos os subprodutos, estes são tratados com o objetivo de melhorar as propriedades desejadas e inerentes ao mesmo. A figura 13 mostra o processo de diferenciação no refino e produção dos óleos usados comercialmente e como cada processo interfere em suas propriedades físico-químicas (TEXACO, 2005).

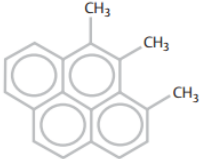
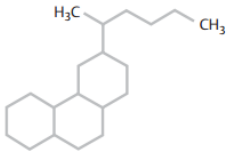
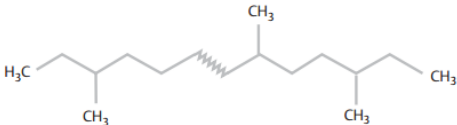
Figura 13 - Demonstração de processos e produtos na refinaria



Fonte: Texaco (2005).

De acordo com a característica química do subproduto do petróleo obtido, os óleos básicos são classificados como indicado na figura 14.

Figura 14 - Estrutura molecular e aplicações dos óleos básicos.

Tipo	Ligação	Algumas Aplicações
Óleos Básicos Aromáticos		Extensores e emolientes na indústria de borracha.
Óleos Básicos Naftênicos		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).

Para permitir que os diferentes grupos de básicos possam ser comparáveis comercialmente e substituíveis no processo de produção de lubrificantes, os óleos básicos foram classificados em grupos que levam em consideração as propriedades abaixo, segundo Texaco (2005).

- Índice de viscosidade (I.V.)
- Percentual de saturados
- Teor de enxofre

Cada aspecto destas propriedades será revisto e aprofundado ao longo deste trabalho.

Como pode ser observado na figura 15, que mostra o processo de refino do petróleo para a produção de subprodutos, estes subprodutos são classificados em subgrupos, sendo estes especificados quanto a suas propriedades mais importantes, como, por exemplo, o ponto de fluidez, resistência a oxidação e volatilidade. A classificação é descrita na tabela 3 abaixo.

Tabela 3 - Grupo de óleos depois de refinados e propriedades.

Grupo	Enxofre, % peso		Saturados, % volume	I.V.
I	> 0,03	e/ou	< 90	80-119
II	≤ 0,03	e	≥ 90	80-119
III	≤ 0,03	e	≥ 90	≥ 120
IV	Todas polialfaolefinas (PAOs)			
V	Todos os básicos não incluídos nos grupos de I a IV (Nafténicos e sintéticos não PAOs)			
VI	Poli-interna-olefinas (PIOs)			

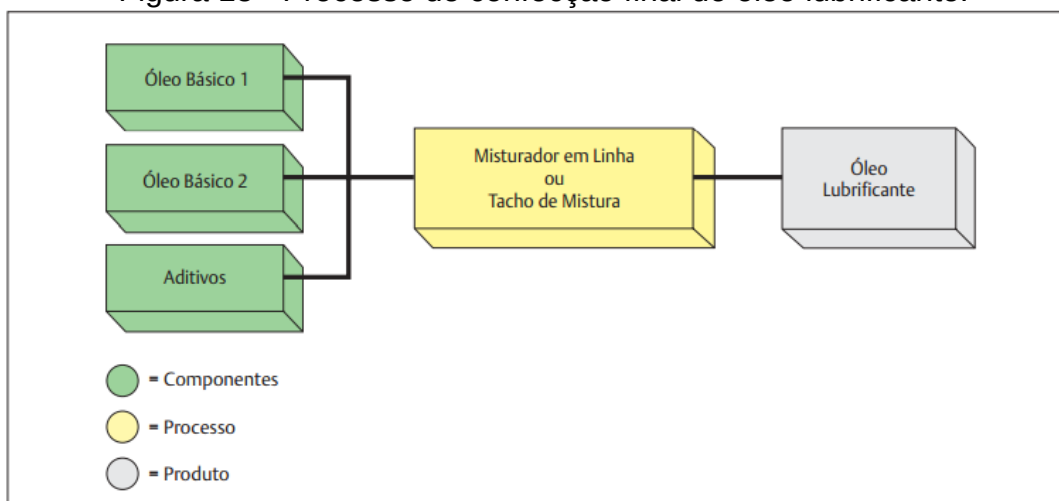
Fonte: Texaco (2005).

2.11 Processo de Produção dos lubrificantes

Os óleos lubrificantes apresentam certas características próprias que lhes são conferidas pela sua composição química (resultante do petróleo bruto), pelo tipo de refino, pelos tratamentos adicionais realizados e pelos aditivos utilizados (TEXACO, 2005).

A figura 15 mostrada abaixo demonstra a produção final do óleo lubrificante através da mistura de dois óleos básicos com propriedades diferentes e da complementação com aditivos.

Figura 15 - Processo de confecção final do óleo lubrificante.



Fonte: Texaco (2005).

2.11.1 Óleos provenientes de petróleo

2.11.1.1 Óleo mineral de base parafínico

São ligas químicas relativamente estáveis e resistentes e não podem ser modificadas facilmente a partir de influências químicas. Sendo assim as parafinas tendem a não oxidar em temperaturas ambientes ou levemente elevadas. Contém em sua composição química hidrocarbonetos de parafina em maior proporção, como mostrado na figura 16. Demonstra uma densidade menor e é menos sensível a alteração de viscosidade/temperatura. Nos lubrificantes eles são partes resistentes e preciosos, que não "envelhecem" ou somente oxidam de forma lenta. A grande desvantagem é seu comportamento em temperaturas baixas: as parafinas tendem a sedimentar-se (TEXACO, 2005).

2.11.1.2 Óleo mineral de base naftênico

Enquanto os hidrocarbonetos parafínicos formam em sua estrutura molecular correntes, os naftênicos formam em sua maioria ciclos, como demonstrado na figura 16.

Os naftênicos em geral são usados, quando necessita-se produzir lubrificantes para baixas temperaturas. A desvantagem dos naftênicos é sua incompatibilidade com materiais sintéticos e elastômeros (TEXACO, 2005).

2.11.1.3 Óleo mineral de base misto

Para atender as características de lubrificantes conforme necessidade e campo de aplicação, a maioria dos óleos minerais é misturada com base naftênic ou parafínico em quantidades variadas.

2.11.2 Óleos sintéticos

São, ao contrário dos óleos minerais, produzidos artificialmente. Eles possuem, na maioria das vezes, uma boa relação de viscosidade-temperatura com pouca tendência de coqueificação em temperaturas elevadas, baixo ponto de

solidificação em baixas temperaturas, alta resistência contra temperatura e influências químicas (TEXACO, 2005).

Existem 5 classificações para óleos lubrificantes sintéticos, como descrito abaixo:

2.11.2.1 Hidrocarbonetos sintéticos

Entre os hidrocarbonetos sintéticos destacam-se hoje com maior importância de um lado os polialfaoleofinas (PAO) e os óleos hidrocraqueados. Estes óleos são fabricados a partir de óleos minerais, porém são feitos por um processo de sintetização, o qual elimina os radicais livres e impurezas, tornando-os mais estáveis à oxidação (TEXACO, 2005).

Também consegue-se através desse processo um comportamento excelente em relação à viscosidade-temperatura. Estes hidrocarbonetos "semi-sintéticos" atingem Índices de Viscosidade até 150 (TEXACO, 2005).

2.11.2.2 Poliolésteres

São utilizados para a fabricação de lubrificantes especiais, fluidos de freios, óleos hidráulicos e fluidos de cortes poli-alquilenoglicóis, miscível ou não em água.

2.11.2.3 Diésteres

São ligações entre ácidos e alcoóis através da perda de água. Certos grupos formam óleos de éster que são usados para a lubrificação e, também, fabricação de graxas lubrificantes. Os diésteres são aplicados em grande escala em turbinas de aviação civil por resistir melhor a altas e baixas temperaturas e rotações elevadíssimas. É o tipo de óleo sintético mais utilizado no mundo (TEXACO, 2005).

2.11.2.4 Óleos de silicone

Os silicones destacam-se pela altíssima resistência contra temperaturas baixas, altas e envelhecimento, como também pelo seu comportamento favorável quanto ao índice de viscosidade. Para a produção de lubrificantes destacam-se os

Fenil-polisiloxanes e Methil-polisiloxanes. O grupo dos Fluorsilicones tem grande importância na elaboração de lubrificantes resistentes à influência de produtos químicos, tais como solventes, ácidos, etc. (TEXACO, 2005).

2.11.2.5 *Poliésteres Perfluorados*

Óleos de flúor e fluorclorocarbonos tem uma estabilidade extraordinária contra a influência química. Eles são quimicamente inertes, porém em temperaturas acima de 260°C eles tendem a craquear e liberar vapores tóxicos (TEXACO, 2005).

2.12 Propriedades Físicas dos Lubrificantes

2.12.1 *Viscosidade do óleo*

O parâmetro mais importante em toda lubrificação é a viscosidade do óleo. Óleos diferentes exibem viscosidades diferentes. Além disso, a viscosidade do óleo muda com a temperatura, taxa de cisalhamento, pressão, sendo também que a espessura do filme de óleo é diretamente ligada a esses fatores. Então, a primeira vista, pode parecer que óleos mais viscosos proporcionariam um melhor desempenho, uma vez que o filme de óleo lubrificante gerado seria mais espesso, permitindo uma melhor separação das duas superfícies em contato. Infelizmente, nem sempre é o caso, já que óleos mais viscosos requerem mais energia para serem cisalhados. Consequentemente, as perdas de energia são maiores e mais calor é gerado, resultando num aumento substancial nas temperaturas superficiais dos corpos em de contato, calor que pode levar à falha do componente ou na degradação do óleo. Para aplicações de engenharia a viscosidade do óleo é normalmente escolhida para proporcionar o melhor desempenho na temperatura desejada de trabalho (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2005).

As viscosidades de óleos diferentes variam em diferentes taxas com a temperatura; a viscosidade também pode ser afetada pelas velocidades relativas das superfícies de contato (taxa de cisalhamento). O conhecimento das características de viscosidade de um lubrificante é muito importante no projeto e para a previsão do comportamento de um sistema de lubrificação mecânica.

Agora nesta parte dos estudos serão abordadas as proporcionalidades a que a viscosidade está exposta, explicando cada tipo de interação e suas resultantes, tal como quais os aspectos serão impactantes no sistema de lubrificação e nas peças protegidas pelo mesmo.

2.12.2 Viscosidade Dinâmica

A viscosidade dinâmica é definida como uma proporção entre forças de cisalhamento e espessura de fluido.

Para melhor exemplificação, considere duas superfícies planas separadas por uma camada de fluido de espessura "h", como mostrado na Figura 16.

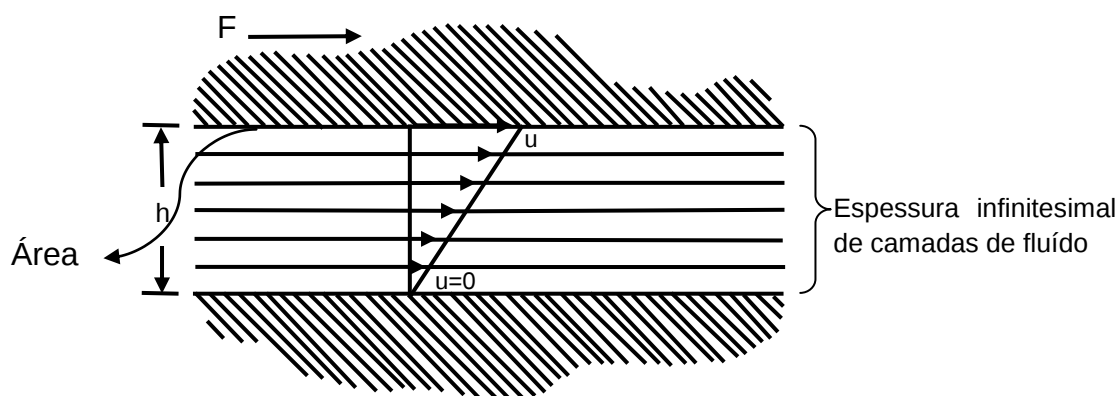
A força requerida para mover a superfície superior é proporcional à área "A" e a velocidade "u", deste modo, de uma maneira simplificada:

$$F \propto A \times u$$

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

$$F \propto A \times \frac{u}{h}$$

Figura 16 - Representação da separação de dois fluidos por óleo lubrificante em uma simulação do escoamento de Couette.



Fonte: Stachowiak e Batchelor (2005).

Esta relação mantém-se para a maioria dos fluidos. Diferentes fluidos irão apresentar uma diferente constante de proporcionalidade " η " chamada de "viscosidade dinâmica". Assim a proporção anterior pode ser reescrita na forma da equação 5:

$$F = \eta \cdot A \cdot u/h \quad (5)$$

Rearranjando-a temos a equação 6:

$$\eta = \left(\frac{F}{A} \right) / \left(\frac{u}{h} \right) \quad (6)$$

Em outra forma, na equação 7:

$$\eta = \mu / \left(\frac{u}{h} \right) \quad (7)$$

Onde:

η é a viscosidade Dinâmica [Pas];

μ é a cisalhamento atuante no Fluido [Pa];

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

2.12.3 Viscosidade Cinemática

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

$$\nu = \eta / \rho \quad (8)$$

Onde:

ν é a Viscosidade Cinemática [m^2/s];

η é a Viscosidade Dinâmica [Pas];

ρ é a Densidade do fluido [Kg/m^3].

A unidade de viscosidade cinemática mais utilizada é a 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 normal de 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], segundo Stachowiak e Batchelor (2005).

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

$$\text{Viscosidade em [cP]} = \text{Viscosidade em [cSt]} \times 0.85 \text{ [g/cm}^3\text{]}.$$

A viscosidade está relacionada a algumas variáveis, mas as mais importantes são: temperatura, cisalhamento e pressão. Como dito anteriormente, a viscosidade é variável e proporcional a alguns fatores, fatores estes que serão abordados e discutidos logo em seguida.

2.12.4 Relação entre temperatura e viscosidade

A viscosidade dos óleos lubrificantes é extremamente sensível à temperatura de trabalho a que é submetida. Com o aumento da temperatura a viscosidade dos óleos cai muito rapidamente. Em alguns casos, a viscosidade do óleo pode cair até 80% com um aumento de temperatura de 25°C. Do ponto de vista da engenharia, é importante conhecer o valor da viscosidade na temperatura de funcionamento, uma vez que isso determina a espessura do filme lubrificante que separa as duas superfícies. A viscosidade do óleo em uma temperatura específica pode ser tanto calculada a partir da equação de viscosidade-temperatura, ou obtida a partir do gráfico de viscosidade-temperatura da ASTM (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2005).

Existem várias equações de viscosidade-temperatura disponíveis, algumas delas são puramente empíricas, enquanto outras são derivadas de modelos teóricos. As equações mais comuns são mostradas na tabela 4:

Tabela 4 - Equações de relação entre viscosidade e temperatura e comentários.

Nome	Equação	Comentários
Reynolds	$\eta = b \cdot e^{-a \cdot t}$	Só é precisa para uma pequena gama de temperaturas.
Slotte	$\eta = a / (b + T)^c$	Razoável; útil em análises numéricas.
Walther	$(v + a) = b \cdot (d)^{1/T^c}$	Constitui a base do gráfico viscosidade-temperatura da ASTM.
Vogel	$\eta = a \cdot e^{b/(T-c)}$	Mais precisa; muito útil em cálculos de engenharia.

Fonte: Stachowiak e Batchelor (2005).

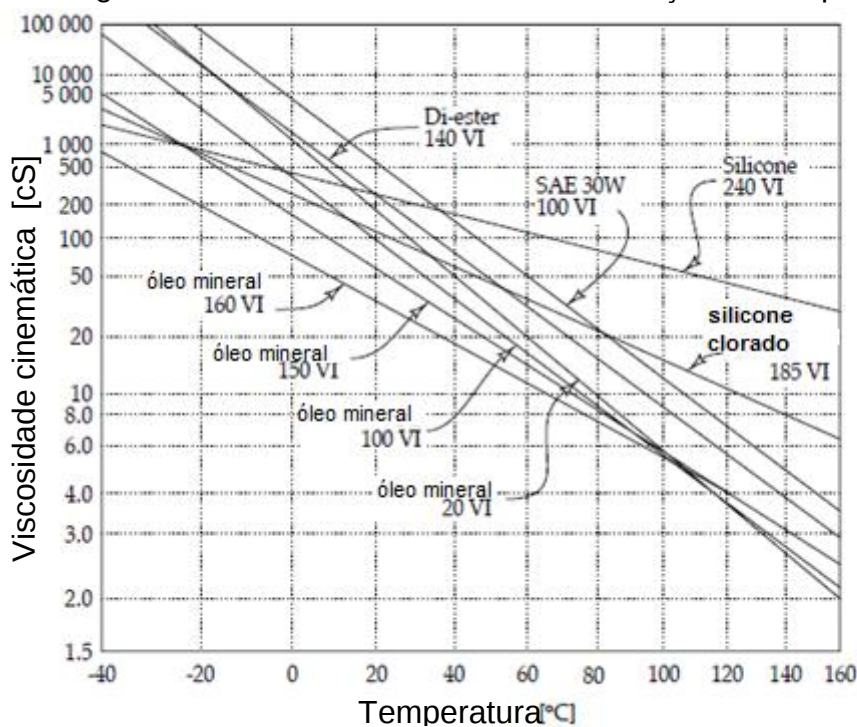
Onde:

- a,b,c, d são constantes;
- ν é a Viscosidade Cinemática [m^2/s];
- T é a Temperatura absoluta [K].

É apresentado na figura 17 diferentes tipos de óleos lubrificantes e como suas viscosidades cinemáticas são susceptíveis a diferentes temperaturas.

O índice de viscosidade da maior parte dos óleos minerais refinados disponíveis no mercado é de cerca de 100, enquanto que os óleos multiviscosos sintéticos tem um maior índice de viscosidade, cerca de 150.

Figura 17 - Gráfico de viscosidade em função da temperatura.



Fonte: Stachowiak e Batchelor (2005).

Para se obter o valor do índice de viscosidade, tem-se que fazer medidas em 40°C e a 100°C.

2.12.5 Relação entre Viscosidade e Pressão

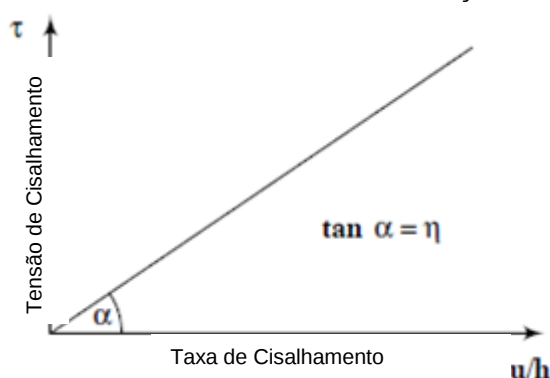
A viscosidade do lubrificante aumenta com a pressão. Para a maioria dos lubrificantes este efeito é consideravelmente maior do que o efeito da temperatura

ou do cisalhamento, quando a pressão é significativamente acima da atmosférica. Isto é de particular importância quando a lubrificação ocorre sobre um grande carregamento de carga, por exemplo, em rolamentos de contato e engrenagens. As pressões encontradas nestes contatos podem ser extremamente altas e a pressão aumenta de uma forma tão rápida que o lubrificante se comporta como um sólido, em vez de um líquido (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2005).

2.12.6 Relação entre Viscosidade e Cisalhamento

Do ponto de vista da engenharia, é essencial saber o valor da viscosidade do lubrificante sob certa taxa de cisalhamento específica. Por questões de simplicidade normalmente é assumido que os fluidos são newtonianos, ou seja, a viscosidade é proporcional à taxa de cisalhamento, como mostrado na Figura 18 (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2005).

Figura 18 - Fluido newtoniano sob efeito de forças de cisalhamento.

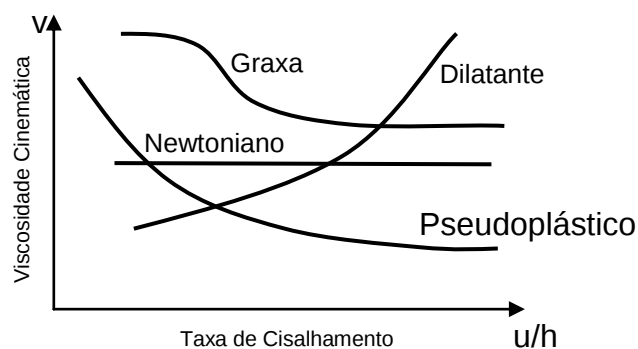


Fonte: Stachowiak e Batchelor (2005).

Os óleos minerais puros, geralmente são considerados newtonianos, pois aguentam um crescimento da taxa de cisalhamento até a ordem de $10^5 - 10^6 \text{ [s}^{-1}\text{]}$; mas com taxas mais elevadas de cisalhamento, que são frequentemente encontradas em aplicações de engenharia, esta proporcionalidade é perdida e o lubrificante passa a comportar-se como um fluido não-Newtoniano (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2005).

O comportamento de alguns fluidos não-Newtonianos são mostrados na Figura 19.

Figura 19 - Gráfico de fluidos não-Newtonianos sob efeito de forças de cisalhamento.



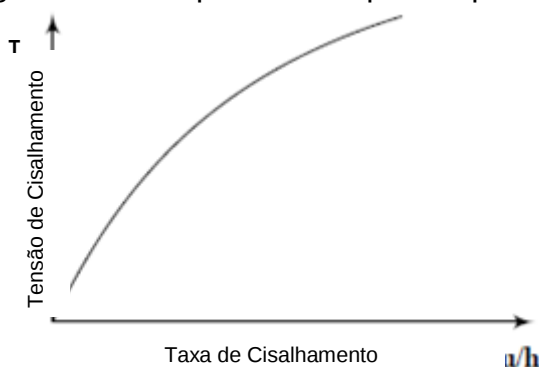
Fonte: Stachowiak e Batchelor (2005).

Existem dois tipos de comportamentos não newtonianos que são importantes na engenharia: o comportamento pseudoplástico e tixotrópico.

2.12.6.1 Comportamento Pseudoplástico

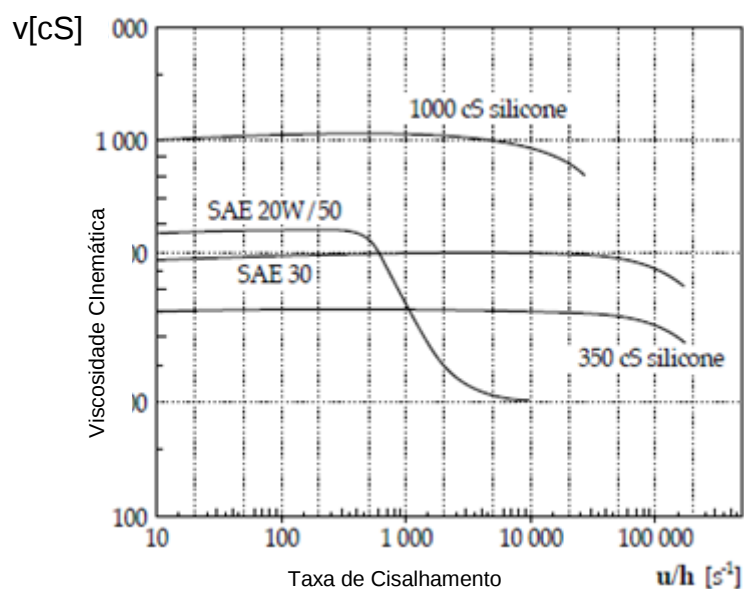
A figura 20 mostra o comportamento pseudoplástico de acordo com a taxa de cisalhamento e a figura 21 mostra alguns exemplos de como a viscosidade se altera nos pseudoplásticos em alguns tipos de óleos lubrificantes:

Figura 20 - Comportamento pseudoplástico.



Fonte: Stachowiak e Batchelor (2005).

Figura 21 - Exemplo de óleos lubrificantes pseudoplásticos.

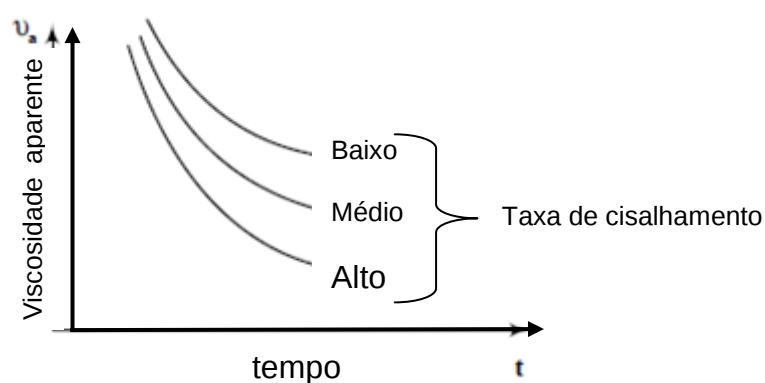


Fonte: Stachowiak e Batchelor (2005).

2.12.6.2 Comportamento tixotrópico

A figura 22 demonstra o comportamento da viscosidade aparente versus tempo para diferentes taxas de cisalhamento, demonstrando o comportamento dos óleos lubrificantes tixotrópicos.

Figura 22 - Comportamento tixotrópico.

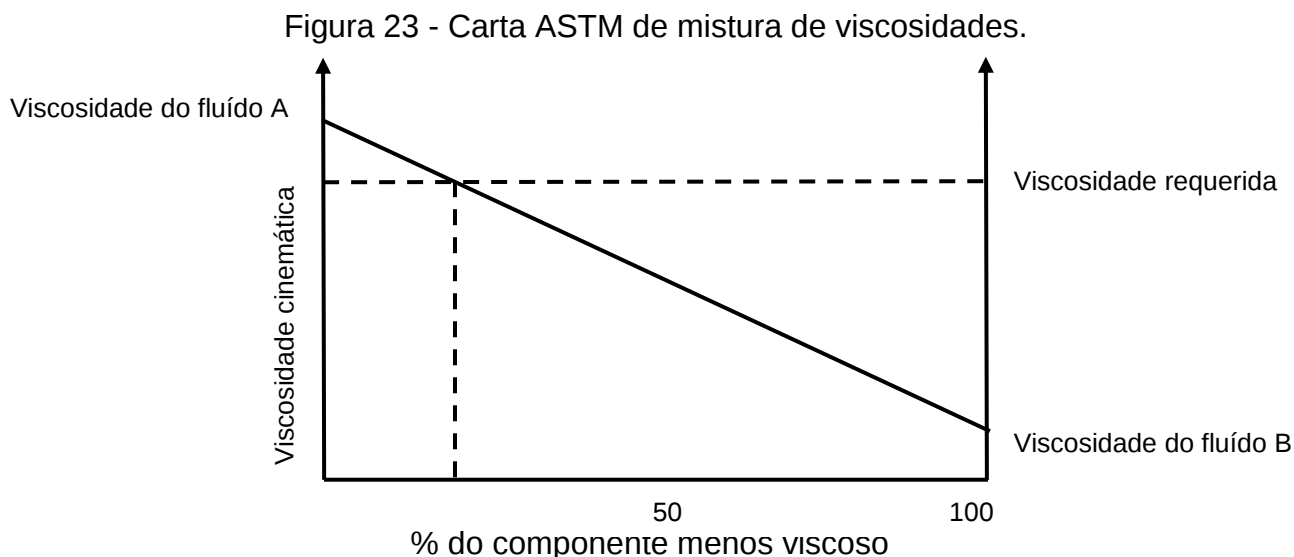


Fonte: Stachowiak e Batchelor (2005).

2.12.7 Viscosidades de misturas

Para certos usos específicos pode ser necessário misturar dois fluidos similares de diferentes viscosidades, a fim de se obter uma mistura com uma

terceira nova viscosidade. Mas para se ter uma terceira viscosidade, deve-se saber quanto do óleo "A" deve ser misturado com o óleo "B". Para isso há uma carta de mistura de viscosidades da ASTM, a abscissa representa a quantidade percentuais de cada um dos fluidos, que é mostrado através da figura 23.



Fonte: Stachowiak e Batchelor (2005).

2.13 Propriedades térmicas dos lubrificantes

As propriedades térmicas mais importantes dos lubrificantes são o calor específico, condutividade térmica e difusividade térmica. Estes três parâmetros são importantes para avaliar os efeitos do aquecimento na lubrificação, isto é, as propriedades de arrefecimento do óleo, a temperatura de funcionamento das superfícies, etc. (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2005).

2.13.1 Calor específico

O calor específico varia linearmente com a temperatura e aumenta com o aumento da polaridade ou de ligações das moléculas de hidrogênio. O calor específico de um óleo é geralmente metade do que a da água. Para lubrificantes minerais e lubrificantes à base de hidrocarbonetos sintéticos, o calor específico está na faixa de 1800[J/kgK] à 0°C até cerca de 3300 [J/kgK] à 400°C (STACHOWIAK;

BATCHELOR, 2005). Para se fazer uma estimativa aproximada do calor específico, a fórmula 9 pode ser utilizada:

$$\sigma = (1,63 + 0,0034 \cdot \theta) / S^{0,5} \quad (9)$$

Onde:

- σ é o calor específico [KJ/Kg.K];
- θ é a temperatura [°C];
- S é a gravidade específica à 15,6°C.

2.13.2 Condutividade Térmica

A condutividade térmica também varia linearmente com a temperatura e aumenta com o aumento da polaridade ou de ligações das moléculas de hidrogênio. A condutividade térmica para lubrificantes minerais e lubrificantes à base de hidrocarbonetos sintéticos está na faixa entre 0,14 [W/mK] a 0°C a 0,11 [W/mK] a 400°C (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2005). Para obter uma estimativa grosseira da condutividade a fórmula 10 é utilizada.

$$K = \left(0,12 / S \right) \times (1 - 1,667 \times 10^{-4} \cdot \theta) \quad (10)$$

Onde:

- K é a condutividade térmica [W/mK];
- θ é a temperatura [°C];
- S é a gravidade específica à 15,6°C.

2.13.3 Difusividade térmica

Difusividade térmica é o parâmetro que descreve a propagação da temperatura nos sólidos, que é definido conforme a equação 11:

$$\chi = K / \rho \cdot \sigma \quad (11)$$

Onde:

- χ é a difusividade térmica [m^2/s];
- ρ é a densidade [Kg/m^3];
- σ é o calor específico [$\text{J}/\text{Kg.K}$];
- K é a condutividade térmica [W/mK].

Os valores de densidade, calor específico, condutividade térmica e difusividade térmica para alguns materiais são dados como exemplo na tabela 5:

Tabela 5 - Densidade, calor específico, condutividade térmica e difusividade térmica para alguns materiais.

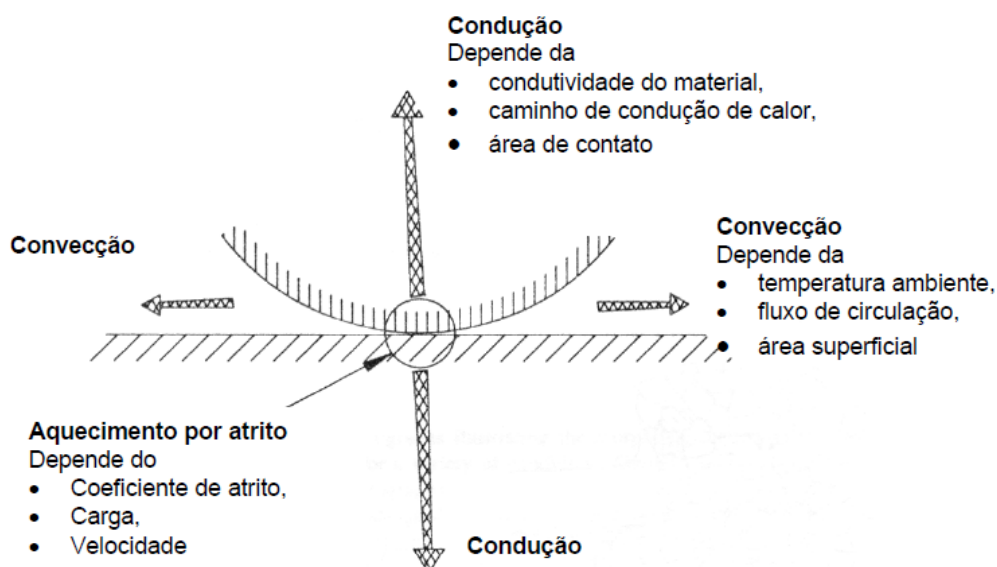
Material	Densidade At 20°C [kg/m^3]	Calor específico At 20°C [J/kg]	Condutividade térmica [W/mk]	Difusividade térmica [$\times 10^{-6} \text{ m}^2 / \text{s}$]
Óleo mineral	700-1200	1670	0.14	0.059-0.102
Água	1000	4184	0.58	0.16
Aço	7800	460	46.7	13.02
Bronze	8800	380	50-65	14.95-19.44
Latão	8900	380	80-105	23.66-31.05
Alumínio puro	2600	870	230	101.68
Liga de alumínio	2700	870	120-170	51.09-72.37

Fonte: Stachowiak e Batchelor (2005).

Bayer (1994) também descreve a temperatura superficial como um fator de importância a ser considerado no que se refere a tribo-superfícies. Entre os fatores que influenciam essa temperatura, há o calor gerado na superfície pelo atrito, as condutividades térmicas dos materiais, os caminhos para a condução de calor para

fora da interface e a temperatura ambiente, como foi citado por Maru (2003). Por sua vez a figura 24 traz um esquema que ilustra estes fatores.

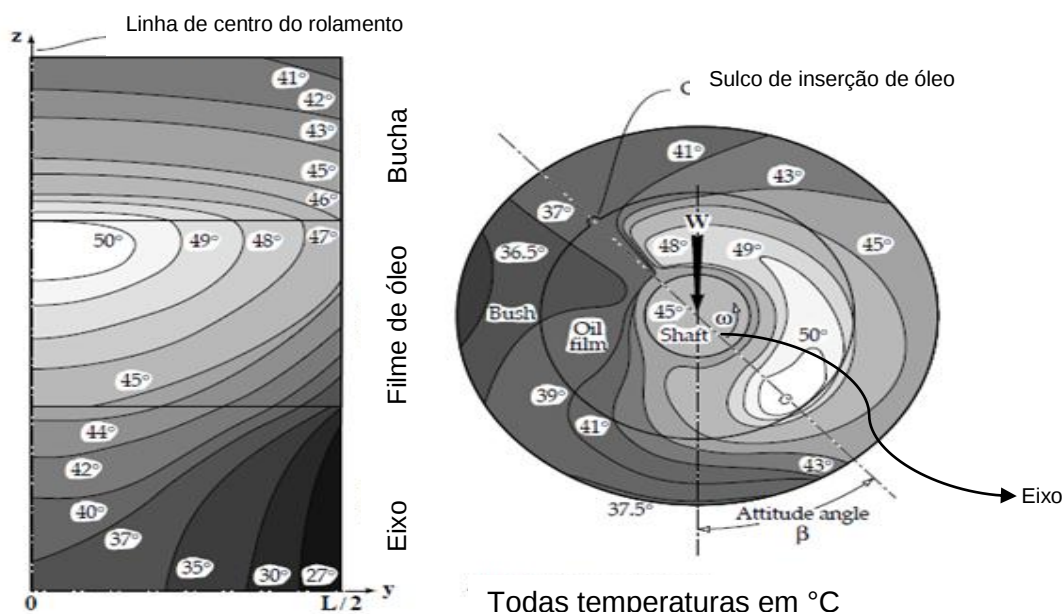
Figura 24 - Fatores que influenciam na temperatura.



Fonte: Maru (2003 apud BAYER, 1994).

O comportamento da distribuição de temperatura pode ser feito computacionalmente, através do método de elementos finitos. A figura 25 ilustra o comportamento da distribuição de temperatura de um componente mecânico sob efeito da lubrificação.

Figura 25 - Exemplo de distribuição de temperatura ao longo de um rolamento hidrodinâmico.



Fonte: Stachowiak e Batchelor (2005).

2.13.4 Características dos lubrificantes sob influência da temperatura

A faixa de temperatura sob a qual o lubrificante trabalhará é de extrema importância para o seu desenvolvimento; em temperaturas elevadas, os óleos lubrificantes podem decompor ou até mesmo degradar, enquanto sob a influência de baixas temperaturas o óleo pode ficar perto de ser um sólido ou congelar. Os óleos podem ser degradados pela decomposição térmica e oxidação, sendo que sob efeito de altas temperaturas os óleos podem aumentar as taxas de reação, influenciar as mudanças de fase, aumentar a difusão e favorecer características de deformação plástica dos materiais (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2005).

Durante o serviço, podem ocorrer vários efeitos indesejados, tal como a contaminação por partículas das superfícies que o óleo está em contato, pode ocorrer também a formação de emulsões devido a contaminação por água, ou também quando agitados vigorosamente produzem espuma. Todos estes efeitos acarretarão na diminuição da eficácia do óleo e por conseguinte danos ao corpo sob sua proteção, segundo (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2005).

O óleo também pode afetar a máquina de uma forma secundária; um exemplo é a corrosão provocada pela acidez de óleos oxidados. Enfim, as propriedades térmicas mais importantes dos óleos lubrificantes são o seu ponto de fluidez, ponto de fulgor, volatilidade, oxidação e estabilidade térmica, tensão superficial, número de neutralização e resíduos de carbono segundo (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2005).

2.13.4.1 Ponto de fluidez

Para se fazer o teste de fluidez é preciso que primeiro se esquite a amostra para que todas as substâncias nela presente se homogeneizem, posteriormente o óleo é resfriado de 3 em 3 graus Celsius. A última temperatura em que o óleo ainda escoar é chamado de ponto de fluidez. Portanto o ponto de fluidez é a menor temperatura em que o óleo é capaz de escoar.

2.13.4.2 Ponto de fulgor

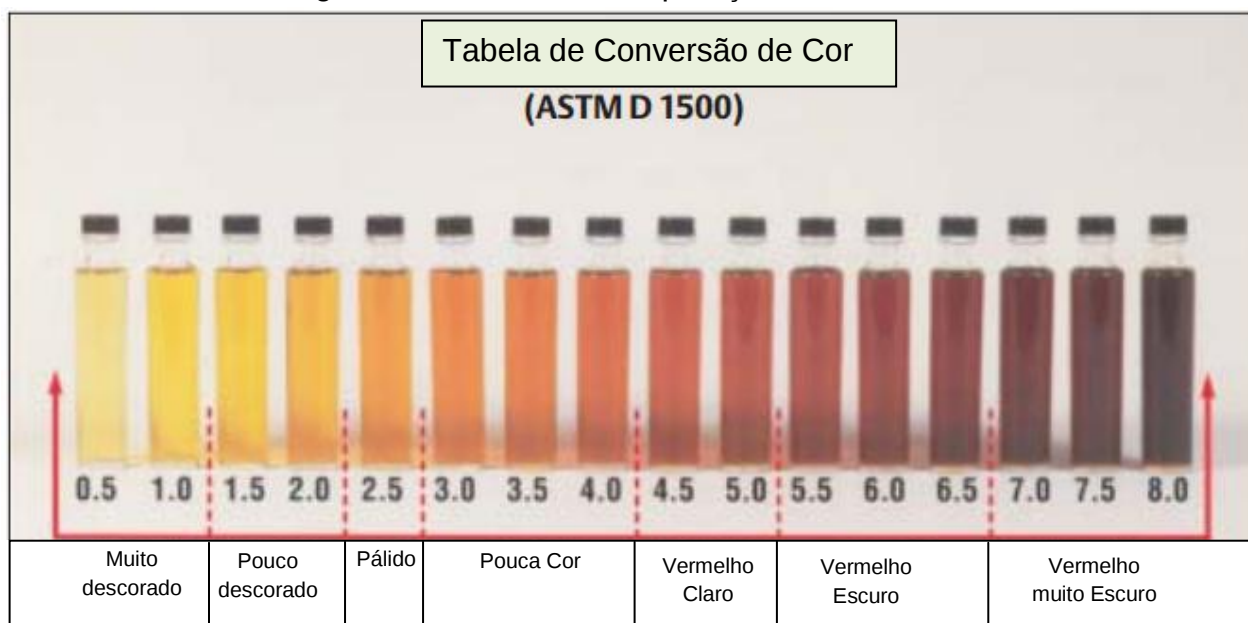
O ponto de fulgor é a temperatura na qual os vapores liberados pelo óleo entram em ignição. Para se fazer o teste é preciso que a amostra esteja em

temperatura e pressão padrão, de modo que seja capaz de produzir vapores de óleo que misturados com o oxigênio presente no ar entram em combustão.

2.13.5 Coloração

Dentre vários métodos empregados para a determinação de cor, o mais usual é o ASTM - 1500. Neste método, uma amostra líquida é colocada no recipiente de teste e, utilizando uma fonte de luz, esta amostra é comparada com discos de vidro colorido, que variam em valor de 0,5 a 8,0; conforme pode ser visto na figura 26. Quando não é encontrada uma equivalência exata e a cor da amostra fica entre duas cores padrão, relata-se a mais alta. Assim, um óleo que tenha a cor entre 2,5 e 3,0 será reportado 3,0. A cor dos óleos não tem relação direta com as características lubrificantes e nem com a sua viscosidade, um óleo mais claro não é necessariamente menos viscoso segundo Texaco (2005).

Figura 26 - Escala de comparação de cores.



Fonte: Texaco (2005).

2.13.6 Ponto de combustão

O ponto de combustão é designado como a temperatura em que o óleo é capaz de produzir vapores suficientes para sustentar a queima por um período maior que 5 segundos.

2.13.7 Volatilidade e Evaporação

A perda de óleo lubrificantes em alguns casos pode ser significativa, sendo a temperatura de trabalho a principal responsável por tal perda. Onde há temperaturas muito altas há a evaporação de ingredientes mais voláteis presentes nos óleos, deste modo, o óleo pode se apresentar mais pastoso ou viscoso, agindo diretamente no fator de atrito entre ele e as superfícies protegidas por tal. Portanto, prejudicando seu desempenho (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2005).

2.13.8 Estabilidade à oxidação

Estabilidade à oxidação é a resistência que o óleo oferece à quebra de moléculas ou seu rearranjo dentro da estrutura em presença de um ambiente atmosférico.

A oxidação do óleo está diretamente ligada à aditivos presentes no mesmo, e também a temperaturas elevadas, vale salientar que sua oxidação se deve ao contato direto com a atmosfera segundo diz Stachowiak e Batchelor (2005).

A oxidação do óleo lubrificante também está ligado ao seu grau de refino na sua fabricação. A figura 27 abaixo mostra o grau de resistência para diferentes graus de refino, que, por conseguinte infere diferentes estruturas moleculares:

Figura 27 - Resistência à oxidação de acordo com a estrutura molecular.



Fonte: Stachowiak e Batchelor (2005).

2.13.9 Estabilidade térmica

Estabilidade térmica é a resistência do óleo à quebra de suas moléculas ou um rearranjo 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. Por exemplo, óleos minerais quando esquentados a elevadas temperaturas tem a quebra das moléculas de metano, etano e etileno segundo Stachowiak e Batchelor (2005).

2.13.10 Tensão superficial

Lubrificantes diferentes apresentam diferenças no seu grau de difusibilidade nas superfícies. Além disso, o mesmo lubrificante pode também mostrar diferentes propriedades de espalhamento da superfície, dependendo do seu grau de oxidação ou na sua modificação por meio de aditivos.

A tabela 6 mostra como a tensão superficial pode mudar para diferentes fluidos.

Tabela 6 - Tensão superficial para diferentes materiais.

Fluído	Tensão superficial [x10 ⁻³ N/m]
Água	72
Óleo mineral	30 - 35
Ésteres	30 - 35
Metil silicone	20 - 22
Cloro-flúor componentes	15 – 18
Poliésteres perfluorados	19 - 21

Fonte: Stachowiak; Batchelor (2005).

2.13.11 *Número de neutralização*

Os óleos lubrificantes usados ou novos podem apresentar características básicas ou ácidas, dependendo de sua origem, processos de refino, aditivos empregados, deterioração em serviço e contaminações.

O teste de Número de Neutralização determina a quantidade e o caráter ácido ou básico de um óleo lubrificante, podendo ser determinado pelos seguintes métodos:

2.13.11.1 *Colorimétrico – ASTM D-974*

O método colorimétrico baseia-se na mudança de coloração de um indicador, sendo pouco preciso para análises de óleos escuros, devido à dificuldade de se observar a mudança de cor do indicador (IPIRANGA, 2013?).

2.13.11.2 *Potenciométrico – ASTM D-664*

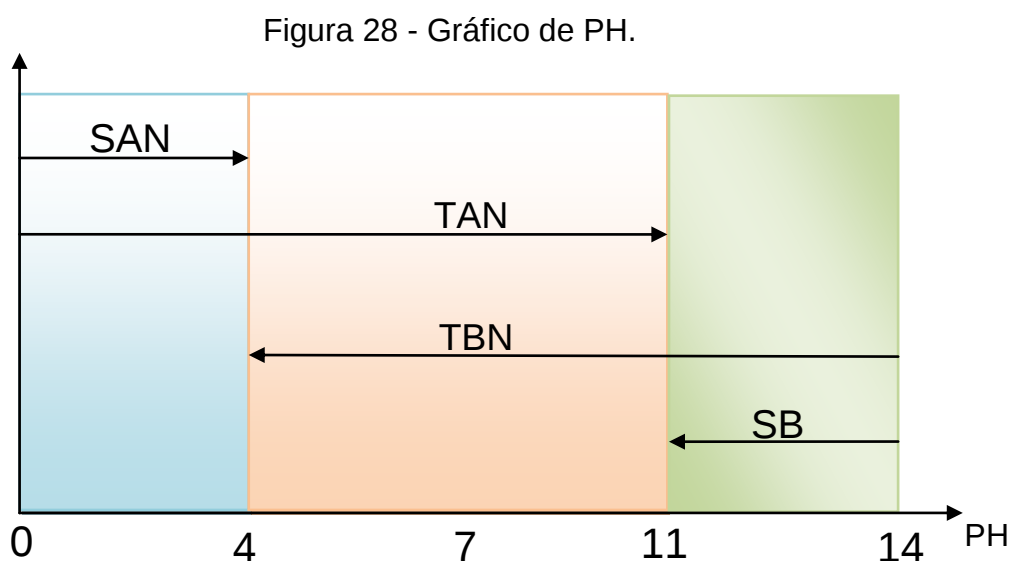
Os métodos potenciométricos, mais precisos que o anterior, baseiam-se na diferença de potencial gerado quando colocam-se dois eletrodos de diferentes materiais na solução que se deseja medir. Esta diferença de potencial pode ser relacionada diretamente ao valor do PH desta solução, podendo variar de 0 a 14, sendo que de 0 a 7 o produto é ácido, de 7 a 14 o produto é básico e o valor 7 indica produto neutro segundo (IPIRANGA, 2013?).

De acordo com o caráter ácido ou básico, o valor do número de neutralização pode ser indicado pelas seguintes classificações segundo Ipiranga (2013?).

- TBN (Total Base Number): É a medida da quantidade de ácido, expressa em miligramas de hidróxido de potássio (KOH), equivalentes ao ácido clorídrico, gasta para neutralizar (até PH=4) todos os componentes básicos presentes em 1 grama de amostra.
- SBN (Strong Base Number): É a medida da quantidade de ácido, expressa em miligramas de hidróxido de potássio (KOH) equivalentes ao ácido clorídrico, gasta para neutralizar (até PH=11) as bases fortes presentes em 1 grama de amostra.

- TAN (Total Acid Number): 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.
- SAN (Strong Acid Number): É a medida da quantidade de base, expressa em miligramas de hidróxido de potássio (KOH), necessária para neutralizar (até PH=4) todos os ácidos fortes presentes em 1 grama de amostra (IPIRANGA, 2013?).

A interpretação prática é demonstrada da figura 28.

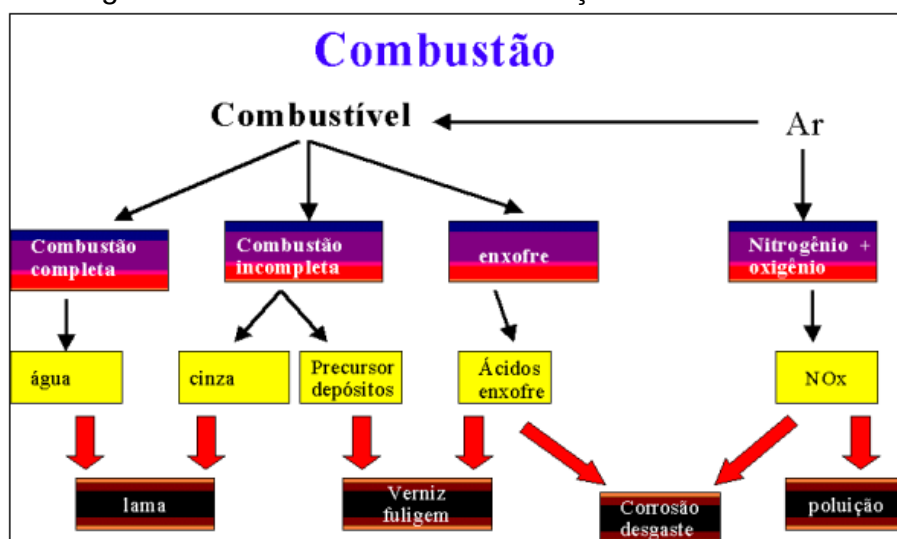


Fonte: Modificado de Ipiranga (2013?).

O aumento do TAN indica uma contaminação do óleo com produtos ácidos provenientes da combustão ou oxidação do mesmo, sendo que neste caso geralmente ocorre uma evidência paralela que é o aumento da viscosidade do óleo. Tem-se verificado que existe uma relação direta entre ácidos orgânicos desta natureza e a ocorrência de corrosão nos mancais de cobre/chumbo dos motores como diz o manual Ipiranga (2013?).

Com óleos novos, os resultados do teste de neutralização fornecem um valor para controle de qualidade do produto. Com óleos usados, os resultados podem servir como um guia do estado mecânico do motor e troca do óleo nas condições de operação ou deterioração do produto. Para melhor ilustração, a figura 29 demonstra o processo de contaminação do óleo lubrificante durante a combustão, para motores de combustão interna (IPIRANGA, 2013?).

Figura 29 - Processo de contaminação na combustão.



Fonte: Ipiranga (2013?).

O TBN mede a capacidade que o óleo possui de neutralizar as substâncias ácidas presentes. O TBN é uma característica importante do óleo, pois representa a reserva alcalina do mesmo, utilizado para neutralizar os ácidos fortes que se formam durante a combustão ou oxidação do óleo, tais com ácidos derivados do enxofre e nitrogênio. Além disso, está comprovado que o valor do TBN pode influir diretamente no comportamento do motor. Deve-se lembrar ainda que, quando o TBN de um óleo lubrificante aproxima-se de zero, a sua reserva alcalina esgotou-se e que a partir deste momento a sua tendência é tornar-se ácido segundo Ipiranga (2013?).

2.13.12 *Resíduo de carbono*

Por volta da temperatura de 300°C ou mais na ausência de ar, os óleos lubrificantes podem produzir moléculas de pequeno peso molecular, que são tipicamente encontrados em óleo minerais. As moléculas de hidrocarbonetos fragmentadas recombina-se para formar depósitos de alcatrão (asfaltenos) ou são liberados para a atmosfera como componentes voláteis.

Os depósitos são indesejáveis em quase todos os casos e a maioria dos óleos lubrificantes são testados quanto suas tendências de formar um depósito destes. O resíduo de carbono (ASTM D189, D524) é determinado pesando o resíduo após o óleo ser aquecido a uma temperatura elevada na ausência de ar. O parâmetro de resíduo de carbono é de pouca importância no caso dos óleos

sintéticos, devido a sua boa estabilidade térmica (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2005).

2.14 Classificação da viscosidade

Existem várias classificações de viscosidade utilizadas ao redor do mundo. As classificações mais comumente utilizadas são a SAE (Society of Automotive Engineers), ISO (International Organization for Standardization) e algumas especificações militares.

2.14.1 Classificação Viscosidade SAE

Os óleos utilizados em motores de combustão interna e transmissões de potência são graduados de acordo com as classificações SAEJ300 e SAE J306, respectivamente.

A viscosidade a baixa temperatura é o indicador da capacidade de partida com uma temperatura fria. A viscosidade medida a 100 °C representa o que acontece no funcionamento normal de um motor. Os óleos sem um sufixo "W" são chamados de "óleos Monograduados", uma vez que só se encontram em um grau SAE; já óleos com o sufixo "W", que significa inverno (winter), tem boa capacidade de partida em ambientes frios. Para climas onde a temperatura cai regularmente abaixo de zero graus Celsius, motores e transmissões à óleo são desenvolvidos de tal forma que oferecem baixa resistência no início do funcionamento, isto é, a viscosidade é baixa na temperatura de partida segundo Texaco (2005).

A tabela 7 exposta abaixo mostra a classificação SAEJ300, para motores de combustão interna.

Tabela 7 - Classificação de viscosidade para motor de combustão interna.

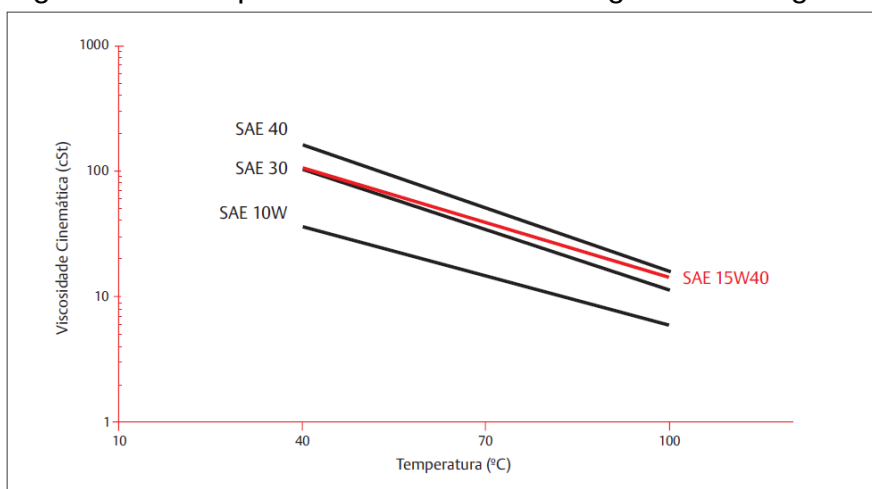
SAE J300 Janeiro 2001 ^a					
Grau de Viscosidade SAE	Viscosidades a Baixas Temperaturas		Viscosidades a Altas Temperaturas		
	Viscosidade máxima ^b (cP)	Viscosidade máxima ^c (cP)	Viscosidade ^d (cSt a 100°C)		Viscosidade ^e (cP a 150°C)
			Mínimo	Máximo	
0W	6.200 até -35°C	60.000 até -40°C	3,8	-	
5W	6.600 até -30°C	60.000 até -35°C	3,8	-	
10W	7.000 até -25°C	60.000 até -30°C	4,1	-	
15W	7.000 até -20°C	60.000 até -25°C	5,6	-	
20W	9.500 até -15°C	60.000 até -20°C	5,6	-	
25W	13.000 até -10°C	60.000 até -15°C	9,3	-	
20	-	-	5,6	< 9,3	2,6
30	-	-	9,3	< 12,5	2,9
40	-	-	12,5	< 16,3	2,9 ^f
40	-	-	12,5	< 16,3	3,7 ^g
50	-	-	16,3	< 21,9	3,7
60	-	-	21,9	< 26,1	3,7

Reimpresso com a permissão da SAE J300 © 2004 Society of Automotive Engineers, Inc.
a) 1cP = 1m Pa.s; 1cST = 1 mm²/s
b) Viscosidade aparente utilizando o Simulador de partida a frio (CCS) - Método ASTM D 5293.
c) Viscosidade aparente utilizando o Viscosímetro rotativo (MRV) - Método ASTM D 4684.
d) Viscosidade cinemática utilizando Viscosímetro capilar - Método ASTM D 445.
e) Viscosidade após cisalhamento de 10⁶s, e temperatura de 150°C utilizando o Viscosímetro simulador de rolamento selado - Método ASTM D 4683.
f) Para óleos SAE 0W40, 5W40 e 10W40.
g) Para óleos SAE 15W40, 20W40, 25W40 e 40.

Fonte: Texaco (2005).

A figura 30 mostrada abaixo exibe a variação da viscosidade dinâmica de acordo com a temperatura, para diferentes tipos de óleos lubrificantes mono e multiviscosos.

Figura 30 - Comparativo entre óleos monograis e multigrais.



Fonte: Texaco (2005).

A classificação SAEJ306 de óleos de transmissão é muito semelhante ao de óleos de motores de combustão interna. A única diferença é que a graduação de inverno é definido pela temperatura em que o óleo atinge a viscosidade de 150.000 [cP]. Esta é a máxima viscosidade do óleo que pode ser usada sem causar danos às engrenagens (TEXACO, 2005). Esta classificação também permite óleos multigraduados. As viscosidades dos óleos de transmissão são mostradas na tabela 8.

Tabela 8 - Classificação de viscosidade para óleos de transmissão.

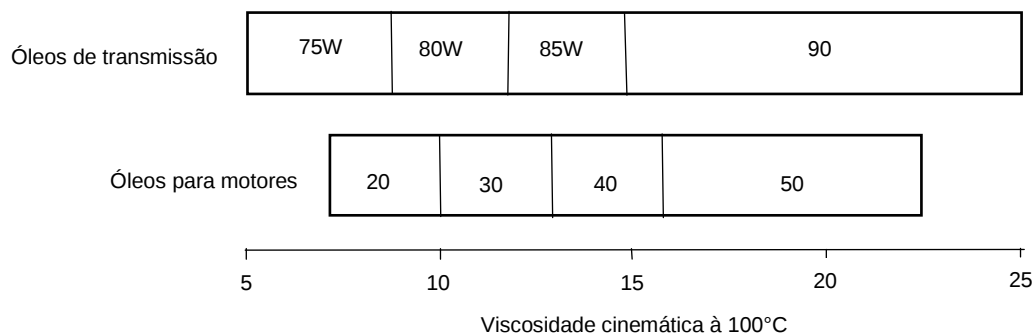
SAE J306 Junho 1998				Proposta de Mudança		
Grau de Viscosidade SAE	Temperatura Máxima para Viscosidade de 150.000 mPa.sec, °C	Viscosidade Cinemática de 100°C, cSt (ou mm²/s)		Grau de Viscosidade SAE	Viscosidade Cinemática a 100°C, cSt (ou mm²/s)	
		Mínimo	Máximo		Mínimo	Máximo
70W	-55	4,1	-	70W	4,1	-
75W	-40	4,1	-	75W	4,1	-
80W	-26	7,0	-	80W	7,0	-
85W	-12	11,0	-	85W	11,0	-
80	-	7,0	< 11,0	80	7,0	< 11,0
85	-	11,0	< 13,5	85	11,0	< 13,5
90	-	13,5	< 24,0	90	13,5	< 18,5
	-			110	18,5	< 24,0
140	-	24,0	< 41,0	140	24,0	< 32,5
	-			190	32,5	< 41,0
250	-	41,0	-	250	41,0	-

Reimpresso com a permissão da SAE J306 © 2004 Society of Automotive Engineers, Inc.

Fonte: Texaco (2005).

Torna-se aparente que óleos de transmissão tem um número dentro da classificação mais alto do que os óleos de motor. Como pode ser visto na figura 31, isso não significa que eles são mais viscosos do que os óleos de motor. Na verdade eles só têm números mais elevados para facilitar a diferenciação entre óleos de motor e óleos de transmissão (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2005).

Figura 31 - Escala de comparação entre óleo de motor e de transmissão.



Fonte: Stachowiak e Batchelor (2005).

2.15 Aditivos

Os aditivos para óleos lubrificantes podem ser definidos como tipos especiais de produtos químicos, de composição exata e conhecida, solúveis ou dispersos no óleo, usados em concentrações adequadas, com a finalidade de reforçar algumas das qualidades dos lubrificantes, lhes ceder novas ou eliminar propriedades indesejáveis.

Em geral, os aditivos são usados para dar aos lubrificantes, em usos específicos, propriedades especiais que podem ser obtidas por meio unicamente dos métodos de refino. Os aditivos são usados em grande escala para aprimorar óleos de qualidade, altamente refinados, não representando um meio para se conseguir produtos de qualidade inferior (TEXACO, 2005).

Classificação dos aditivos lubrificantes (TEXACO, 2005):

- Modificantes de características físicas dos óleos: Índice de viscosidade, ponto de fluidez e espuma.
- Modificantes químicos: Inibidores de oxidação, agentes antidesgaste e dispersantes.

Os aditivos químicos têm diferentes funções e servem para proteger as superfícies metálicas lubrificadas do ataque químico pela água ou outros eventuais contaminantes.

2.16 Contaminantes e impurezas dos óleos lubrificantes

2.16.1 Teor de água

O teor de água no óleo lubrificante é determinado segundo as especificações das normas ASTM e é designado como o tanto de água que há presente no lubrificante. O teste pode ser feito usando-se a destilação, centrifugação, Karl Fischer e voltametria; e o resultado pode ser expresso em partes por milhão, porcentagem em volume e porcentagem em massa.

A oxidação e corrosão são diretamente ligadas ao teor de água presente. Se houver uma contaminação acima da considerada normal de água no óleo lubrificante pode-se formar uma emulsão, que é proveniente da mistura das duas substâncias, esta emulsão é prejudicial ao funcionamento do sistema, podendo causar algum tipo de falha (IPIRANGA, 2013?).

2.16.2 Teor de enxofre

O teor de enxofre no óleo lubrificante é determinado segundo a especificação da norma ASTM D-129, e representa a quantidade de enxofre que há no óleo. O enxofre pode trazer benefícios e malefícios ao funcionamento das máquinas em operação, por exemplo, ele é um bom agente de fronteira, podendo operar sob condições extremas de pressão e temperatura. Por outro lado, é muito corrosivo (IPIRANGA, 2013?).

2.16.3 Teor de cinzas

Há presente no óleo lubrificante um certa quantidade de material proveniente da falta de combustão completa do combustível, sendo que essa quantidade pode ser medida através do índice de cinzas presente no combustível, segundo a norma ASTM D-482. Estes contaminantes podem ser provenientes de desgaste, produtos sólidos da combustão e poeira atmosférica que pode entrar pelo filtro de ar, estas cinzas são parcialmente removidas pelo filtro do óleo (IPIRANGA, 2013?).

2.16.4 Teor de cloro

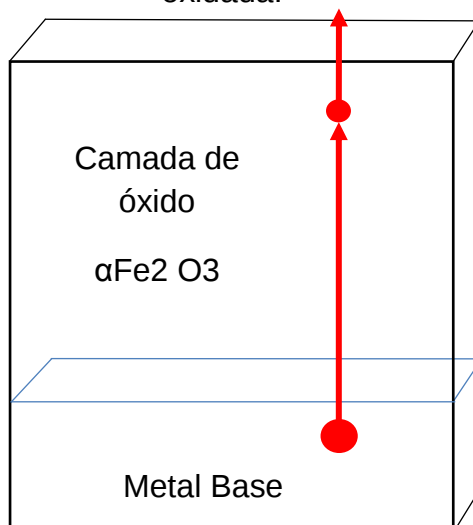
A quantidade de cloro deve ser controlada para que trabalhe dentro de um padrão aceitável, já que seu excesso causa a corrosão e sua falta causa um maior atrito (IPIRANGA, 2013?).

2.17 Aquecimento de ferrogramas

A composição das partículas de desgaste podem ser obtidas também através do aquecimento dos ferrogramas obtidos pelo RPD (rotary particle depositor), as partículas presentes no ferrograma mudam de cor conforme o aquecimento nelas imposto. Partículas de ligas ferrosas podem ser classificadas em categorias de acordo com a cor que as mesmas adquirem quando aquecidas. Partículas de estanho serão altamente afetadas porque possuem um baixo ponto de fusão e é susceptível à oxidação. Outros tipos de materiais não ferrosos utilizados em óleos lubrificantes são, por exemplo, alumínio, cromo, prata e titânio. Estes materiais não são afetados pelo tratamento térmico acima de 550°C exceto pelo titânio que fica amarronzado a uma temperatura ligeiramente acima de 400°C, em temperaturas mais baixas o titânio não é afetado. Por sua vez, magnésio, molibdênio e zinco são difíceis de serem distinguidos de outros materiais não-ferrosos. Partículas de ligas de cobre são facilmente identificadas pelas suas colorações até mesmo sem o uso do aquecimento, as ligas de cobre são diferenciáveis entre si, já que formam colorações diferentes sob o calor, sendo que há vários tipos de ligas de cobre, sendo que cada liga está sob uma orientação cristalográfica diferente e submetido a um tipo diferente de tensão, o que influencia na sua mudança de cor, conforme diz Anderson (1995).

A coloração formada devido à exposição ao aquecimento é devido à formação de uma camada de óxido na superfície em contato com o ar. Interferências destrutivas dão origem ao aparecimento de novas cores dependendo da espessura da camada oxidada. Se uma luz branca incidir em uma liga ferrosa tratada termicamente pelo processo, uma parte da luz será refletida da interface oxido/ar e parte da luz incidida passará através da camada do óxido formado e será refletida pela interface óxido/metal, conforme mostra a figura 32.

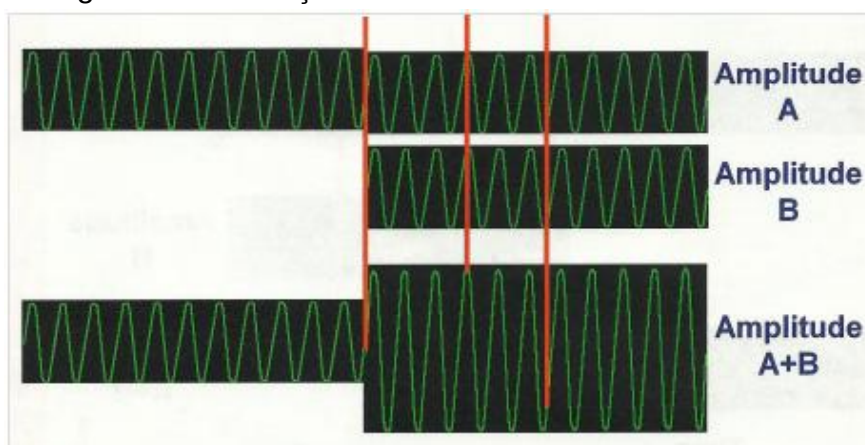
Figura 32 - Exemplo da incidência e reflexão da luz no material e na camada oxidada.



Fonte: Modificado de Trico (2008).

A interação destas duas partes da luz refletida dará a espessura da camada de óxido e sua cor. Cada parte da luz será defasada uma da outra conforme espessura da camada oxidada e material, dependendo dessa forma do seu comprimento de onda; assim sendo, poderá haver superposição das ondas ou sua destruição, formando um feixe de luz com um comprimento de onda diferente, o que gera uma coloração também diferente. A interação dos comprimentos de onda pode ser descrita através da figura 33.

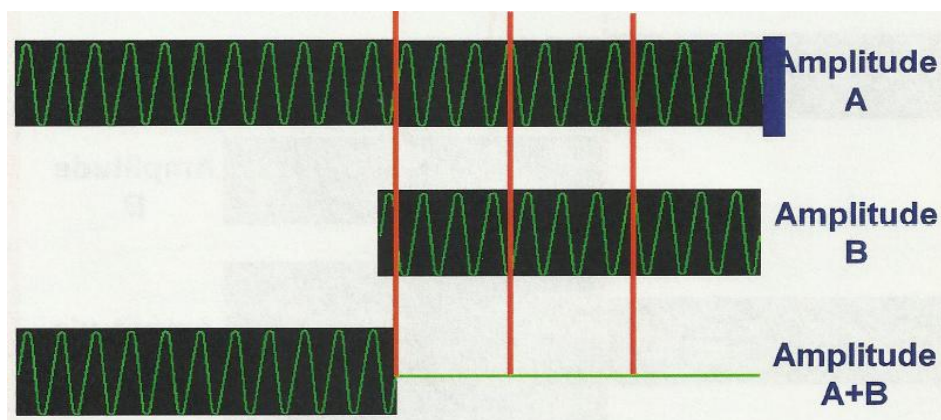
Figura 33 - Interação de duas ondas construtivamente.



Fonte: Trico (2008).

A figura 34 mostra a interação de ondas em fase, ou seja, há a soma de suas amplitudes.

Figura 34 - Interação de duas ondas destrutivamente.

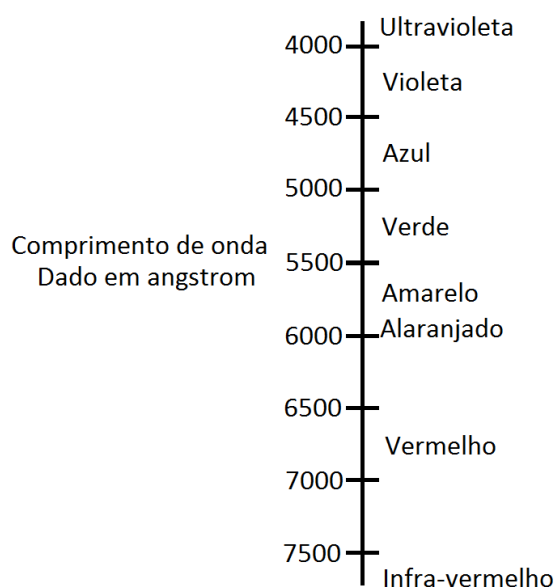


Fonte: Trico (2008).

A figura 34 mostra a interação de duas ondas em fase de 180°, onde há o parcial anulamento das amplitudes.

Desta forma, reflexos com comprimentos de onda pequenos, dentro do espectro das luzes visíveis, será violeta/azul, conforme descrito na figura 35 que dá a coloração adequada ao comprimento de onda da luz refletida.

Figura 35 - Coloração e respectivo comprimento de onda.



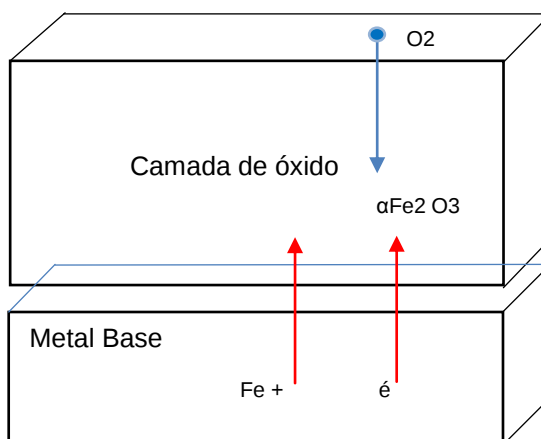
Fonte: Modificado de Trico (2008).

As camadas oxidadas crescem de acordo com o aquecimento a que são submetidas, sendo que crescem mais com um maior aquecimento, uma liga metálica ferrosa seguirá a ordem dada a seguir de acordo com seu contínuo aquecimento,

amarronzada, palha, violeta/azul, azul claro e finalmente um acinzentado opaco.

Conforme maior o aquecimento, maior será a transferência de íons capacitados com uma maior carga energética, o que gera uma maior camada de óxido. A figura 36 ilustra a transferência dos elétrons.

Figura 36 - Transferência de elétrons entre material base e camada oxidada.



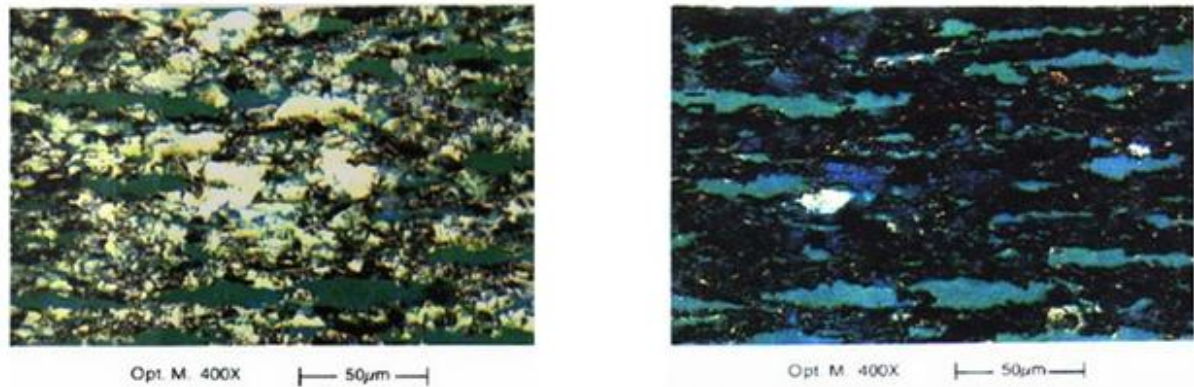
Fonte: Modificado de Trico (2008).

O crescimento da camada de óxido com o aquecimento é diretamente ligada ao tipo de material que se encontra presente na liga que se está analisando. Ligas em que se encontram poucos elementos complementares apresentam um crescimento rápido da camada oxidada. Materiais como o ferro fundido que apresentam em sua composição bastante carbono, apresentam uma taxa mais reduzida de crescimento da camada oxidada. Aços de alta liga, que contém grandes porcentagens de cromo e níquel também tem uma taxa de crescimento da camada de óxido reduzida (TRICO, 2008).

O processo que consiste em se aquecer os ferrogramas à 330°C por 90 segundos, permite fazer a classificação em três níveis distintos, que são:

- Aços de baixa liga se tornam azuis, conforme figura 37.

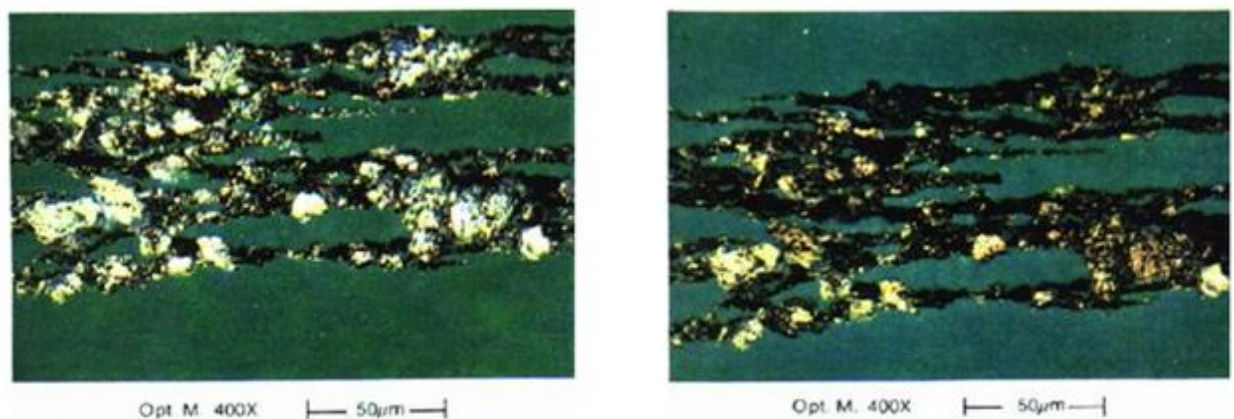
Figura 37 - Estas figuras mostram aço de baixa liga antes e depois do aquecimento à 330°C.



Fonte: Anderson (1995).

- Aços de média liga se tornam amarronzados, conforme figura 38.

Figura 38 - Estas figuras mostram aço de média liga (ferro fundido) antes e após aquecimento à 330°C.



Fonte: Anderson (1995).

- Aços de alta liga não sofrem influência da temperatura.

A espessura da camada oxidada para a interferência destrutiva violeta/azul que gera o aparecimento da coloração amarronzada é dada por:

$$x = \frac{\lambda}{4n} \quad (12)$$

Onde:

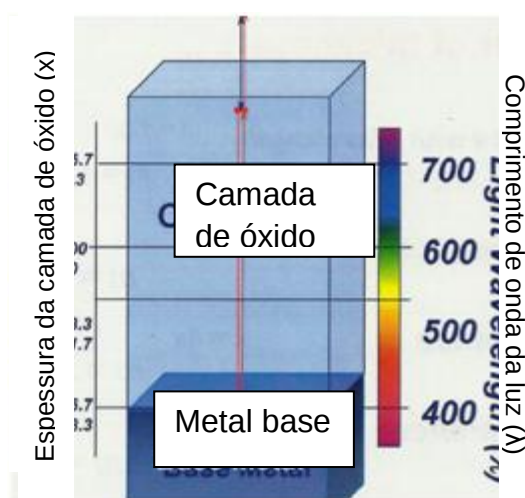
X é a espessura a camada oxidada;

λ é o comprimento de onda da luz;

n é o índice de refração do material, que é dado através da razão da velocidade da luz no vácuo pela velocidade da luz no material em questão.

A figura 39 demonstra a relação entre a espessura da camada oxidada e o comprimento de onda para uma interação destrutiva.

Figura 39 - Relação entre comprimento de onda e espessura da camada oxidada.



Fonte: Trico (2008).

Algumas partículas presentes no ferrograma também podem se tornar invisíveis no microscópio, se uma dada partícula for demasiadamente fina ela pode sofrer oxidação por um todo, ou seja, a camada de óxido formada pode consumi-la toda, deixando assim toda a luz incidente refletir de volta, impossibilitando sua identificação e apresentando-se transparente.

Na utilização da técnica do aquecimento de ferrogramas, deve-se primeiro saber a composição das peças que o óleo lubrificante entrou em contato durante a lubrificação. Para uma primeira análise, o aquecimento da amostra à uma temperatura de 330°C já é o suficiente. Através desta técnica também é possível se diferenciar com facilidade partículas de componentes de origem orgânica ou inorgânica. Enquanto estes componentes orgânicos são facilmente confundidos com componentes inorgânicos quando submetidos somente à análise se luz polarizada no microscópio. Devido ao aquecimento, estas partículas podem derreter, murchar ou carbonizar. Depois de tratados termicamente, partículas orgânicas apresentam

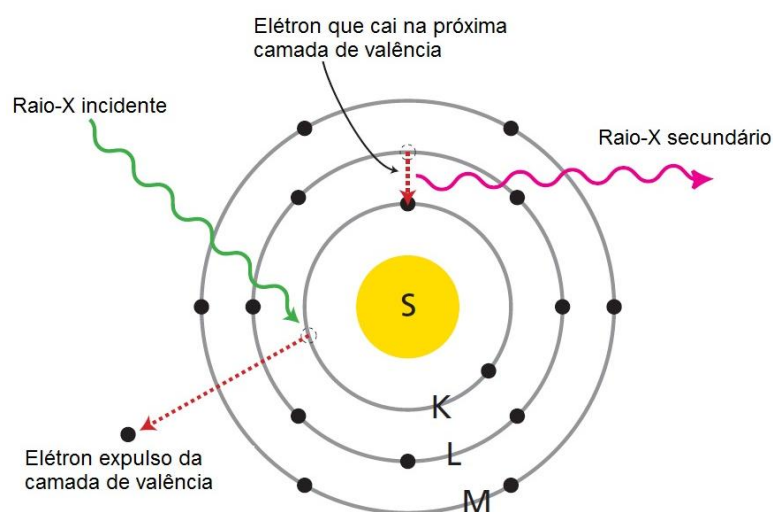
uma aparência opaca sob incidência de uma luz polarizada no microscópio (TRICO, 2008).

2.18 Espectrômetro de Raio X

O espectrômetro de Raio-X é um aparelho que utiliza a refração de ondas energéticas de raio-X para obtenção da quantificação e espécie das partículas presentes na amostra. Este aparelho em específico permite a obtenção de resultados para 19 elementos da tabela periódica. Para isso o aparelho lança em cada amostra três faixas de energia, de acordo com cada faixa e com a quantidade de energia obtida de volta no aparelho, o mesmo faz a medição para obtenção do elemento químico e quantidade do mesmo na amostra.

Deste modo, assim que a onda energética atinge a camada de valência de cada elemento há uma excitação dos elétrons que orbitam em torno do núcleo, deixando os mesmos mais energizados. Com mais energia, os elétrons tendem a pularem para camada de valência de maior energia, assim liberando espaço para que outro elétron ocupe seu espaço, desta forma, o elétron que cai de camada de valência desprende energia para ocupar o este espaço vago, conforme pode ser visto na figura 40.

Figura 40 - Modelo de transferência de elétrons.



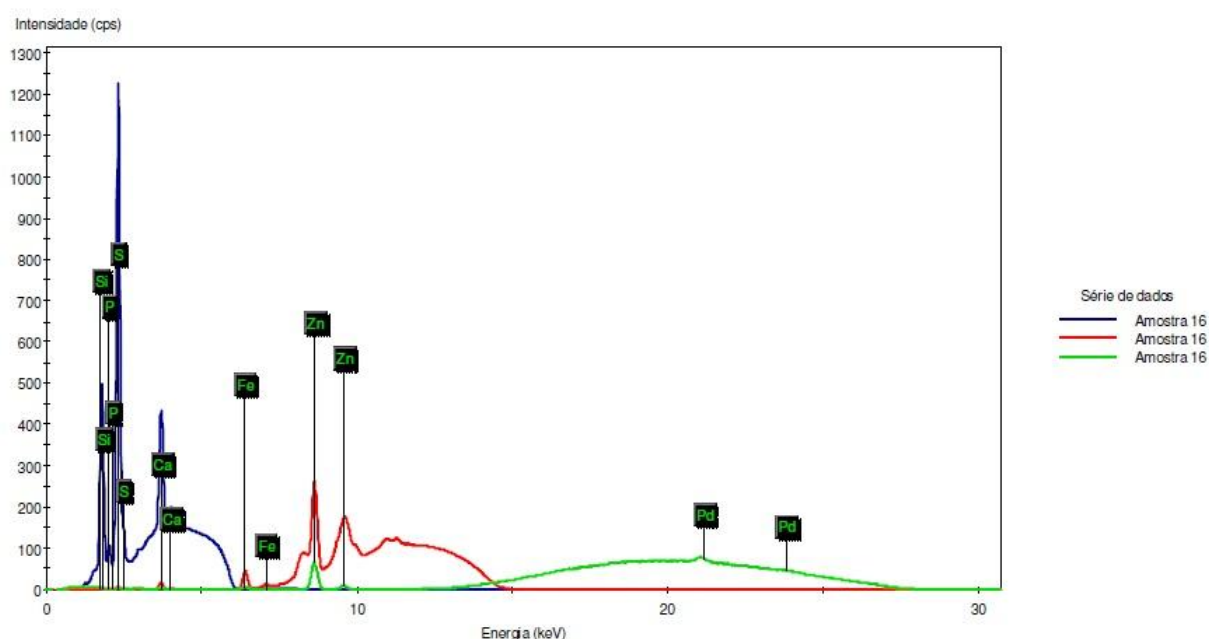
Fonte: Modificado de Oxford Instruments (2013).

Através do aparelho de raio-X do modelo “X-supreme”, temos a possibilidade de acharmos as três faixas de energia e quais elementos se encontram em tais faixas, assim como seus valores energéticos, conforme se pode visualizar na figura 41.

Figura 41 - Varredura de espectro da amostra 16.

Tabela de Condição de Análise

Nome da Amostra	Detector	kV	Corrente	PBF	SBF	Hélio	Tempo vivo	Tempo morto
Amostra 16	SDD	6kV	500uA	Open	N/A	Sim	230.0s	23%
Amostra 16	SDD	15kV	100uA	A6	N/A	Não	238.0s	21%
Amostra 16	SDD	30kV	100uA	W5	N/A	Não	24.0s	20%



Fonte: Elaboração do autor com imagem do aparelho de Raio-X do Departamento de Engenharia Mecânica da UNESP, Ilha Solteira.

2.19 O custo do atrito e desgaste

Como mencionado por Stachowiak et al. (2005), o custo causado pelas deficiências tribológicas para qualquer economia nacional, é causada principalmente por uma grande quantidade de energia e materiais que são perdidos nos mecanismos das máquinas em operação. Ao se fazer uma análise levando-se em conta uma única máquina, as perdas são consideradas pequenas. No entanto, quando a perda da mesma é repetida em, talvez, um milhão de máquinas de um ramo semelhante, os custos tornam-se muito gigantescos.

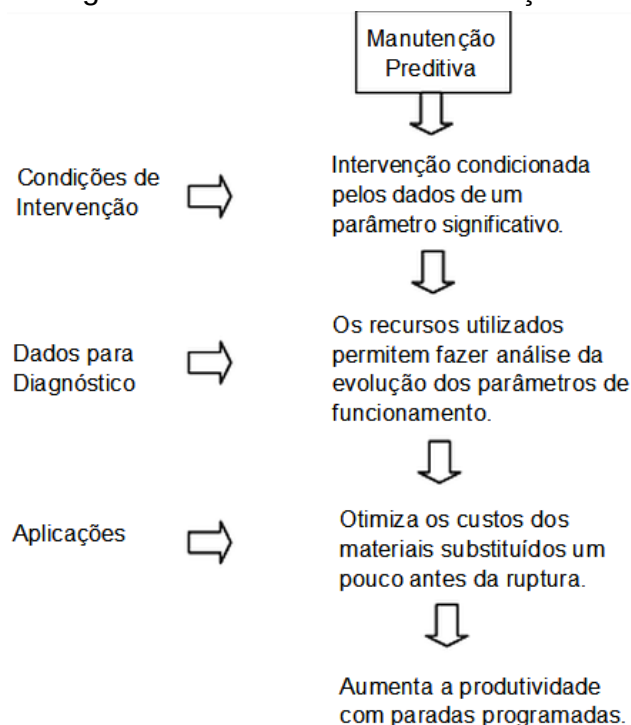
Uma equação tribológica pode ser usada para se obter uma simples estimativa dos custos ou benefícios da prática tribológica existente ou de uma eventual melhora da mesma. Tal equação pode ser escrita de forma simplificada como:

$$\text{Custo tribológico Total} / \text{Economia dos custos} = \text{Soma do custo de cada máquina} / \text{Economia dos custos} \times \text{Número de máquinas tratadas.}$$

Esta equação pode ser aplicada a qualquer outro problema, a fim de se estimar aproximadamente a relevância da tribologia para uma situação particular.

Fazendo a utilização da tribologia para evitar perdas, o fluxograma da figura 42 demonstra claramente o processo da manutenção preditiva para fazer a reparação do maquinário, perdendo o menor tempo possível e visando evitar gastos extras.

Figura 42 - Processo de intervenção.

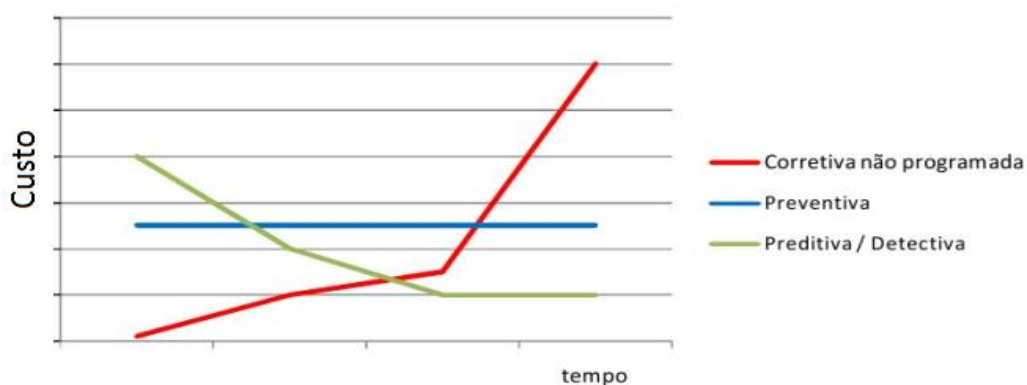


Fonte: Oliveira (2010).

A figura 43 demonstra o desdobramento de custos ao longo do tempo, levando em consideração cada tipo de manutenção, corretiva, preventiva e preditiva.

Vê-se que ao longo do tempo, o uso da tribologia na previsão de uma parada certa é plausível. Constata-se também que o uso da manutenção preditiva em equipamentos baratos não satisfaz economicamente a empresa em questão, já que no início, a preditiva é muito mais cara do que comparada às outras.

Figura 43 - Demonstração da evolução dos custos de cada tipo de manutenção.

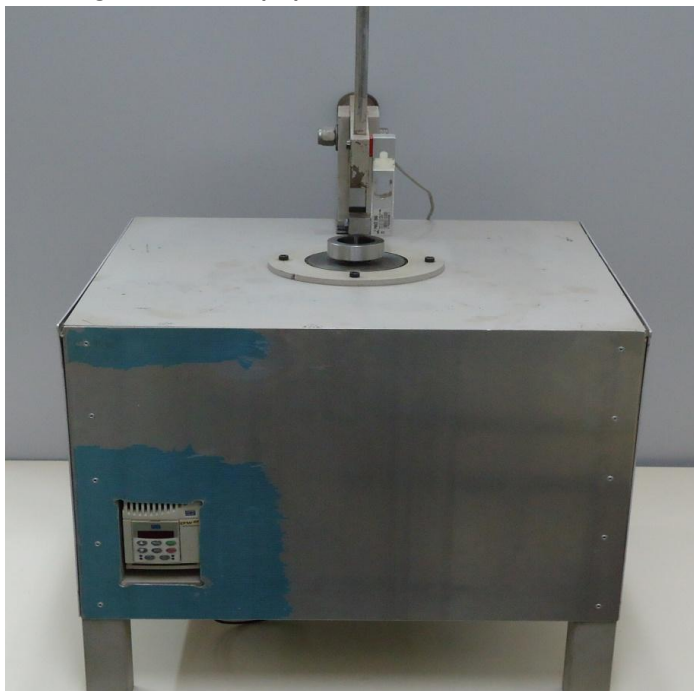


Fonte: ASL Manutenção Eletromecânica e Serviços (2012).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A Figura 44 mostra o aparelho Pin-on-disk utilizado nos experimentos. Este aparelho pertence ao Laboratório de Análises de Partículas em Óleos lubrificantes (LAPO) da UNESP de Ilha Solteira.

Figura 44 - Equipamento de Pin-on-disk.

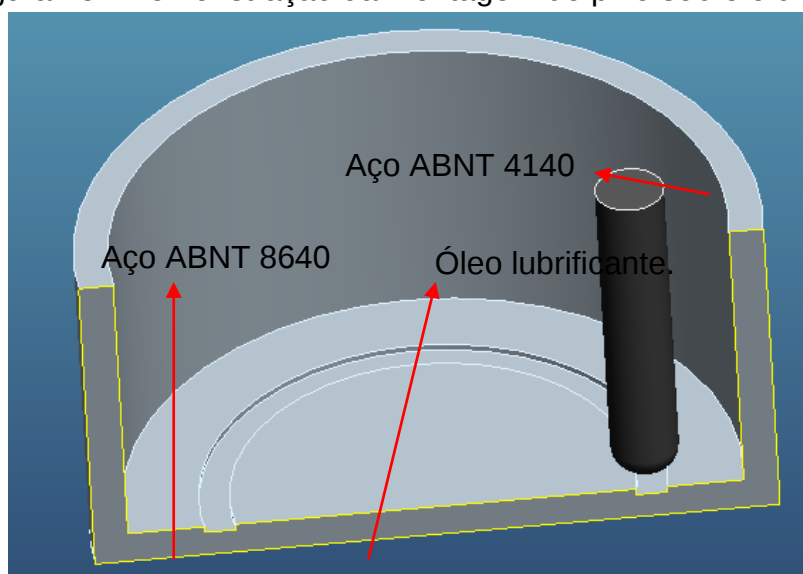


Fonte: Elaboração do próprio autor.

O trabalho desta dissertação consiste na utilização deste aparelho para simular o atrito entre dois tipos de materiais, o aço ABNT 8640 e o aço ABNT 4140, sob o efeito de vários tipos de lubrificantes e contaminações. Esses materiais são normalmente utilizados em construções mecânicas, mas neste trabalho em especial, é usado para simular peças de um motor de combustão interna, como se houvesse o contato direto das mesmas.

Para a realização dos testes no equipamento, foram construídas as peças a serem ensaiadas: um copo (disco) de aço ABNT 8640 e um pino de aço ABNT 4140, onde o pino está sob efeito de carregamento, como pode ser visto na Figura 45.

Figura 45 - Demonstração da montagem do pino sobre o disco.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Os materiais que foram ensaiados, ou seja, o pino e o disco foram submetidos a um teste de rugosidade, esta análise serve para verificar qual a magnitude das asperezas que as superfícies adquirem após os testes. O teste com o rugosímetro foi feito no fundo do copo, ou seja, no disco e na ponta do pino para a verificação do estado em que se encontram as superfícies das peças após os testes.

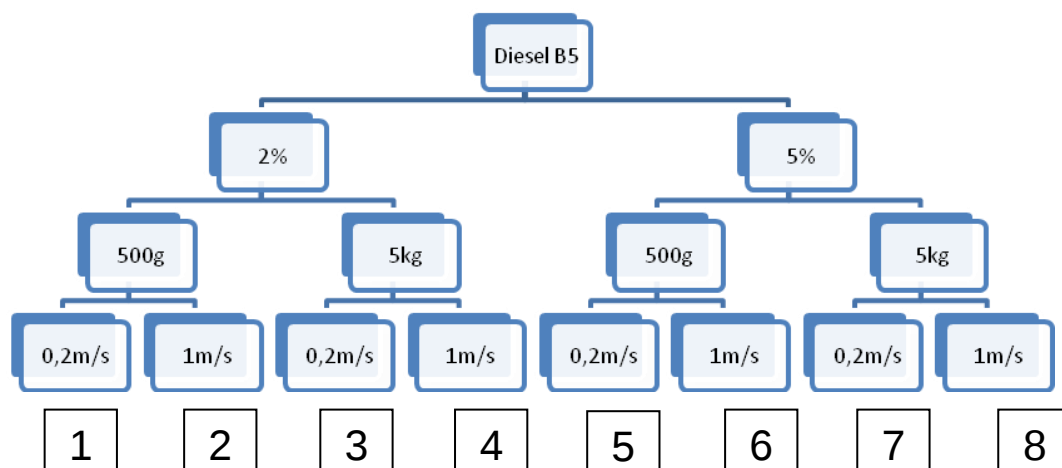
A rugosidade foi medida através do Rugosímetro Mitutoyo, modelo: SJ-201P. A rugosidade verificada foi a média (Ra), o aparelho também é capaz de dar valores de pico e vale, mas neste trabalho não seria interessante a medida dos mesmos. As medidas foram feitas em três regiões diferentes no disco e em três direções diferentes no pino, a medida a ser considerada provém da média destas três medidas.

Foram usados quatro tipos de contaminantes para o óleo lubrificante: Diesel B5 comercial; Biodiesel de origem Vegetal (Girassol); Biodiesel de origem Animal (Sebo); Biodiesel de origem Vegetal e Animal misturados.

Assim os ensaios foram feitos do seguinte modo:

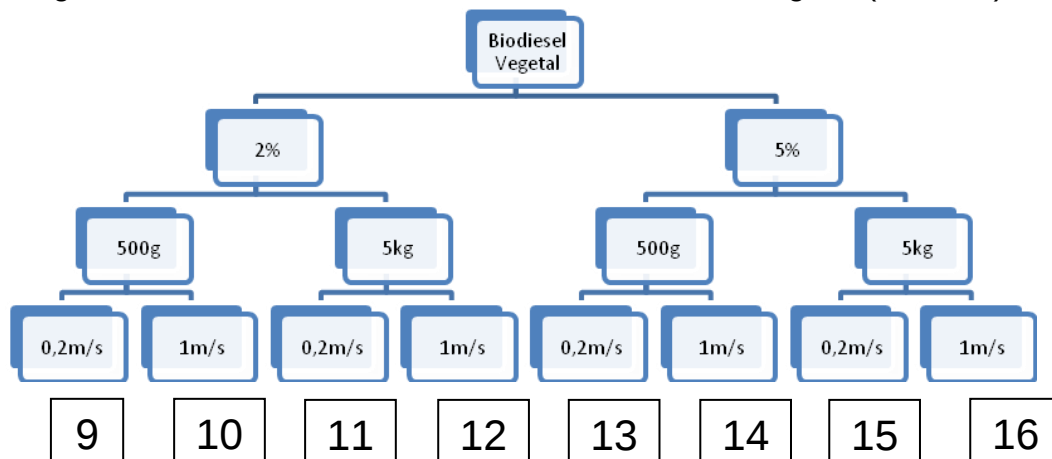
Para a realização de cada ensaio, usaram-se duas velocidades, para cada velocidade usou-se duas cargas diferentes e para cada teste uma porcentagem diferente de contaminante. As cargas foram de 500g e 5 kg. As velocidades de 0,2 m/s e 1 m/s, e contaminações de 2% e 5%. Para um melhor entendimento e para melhor explanação futura as amostras serão enumeradas, conforme mostra as figuras 46 à 49.

Figura 46 - Ensaio com o contaminante Diesel B5.



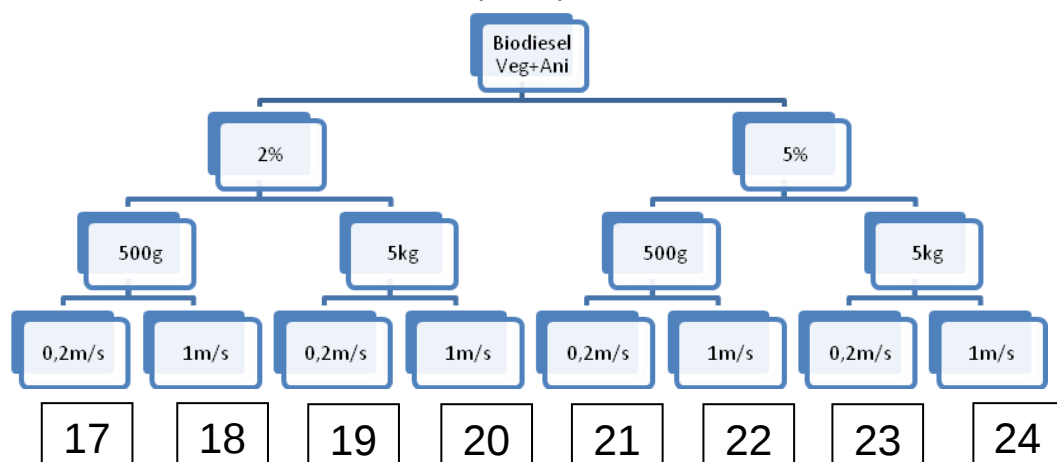
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 47 - Ensaio com o contaminante Biodiesel Vegetal (Girassol).



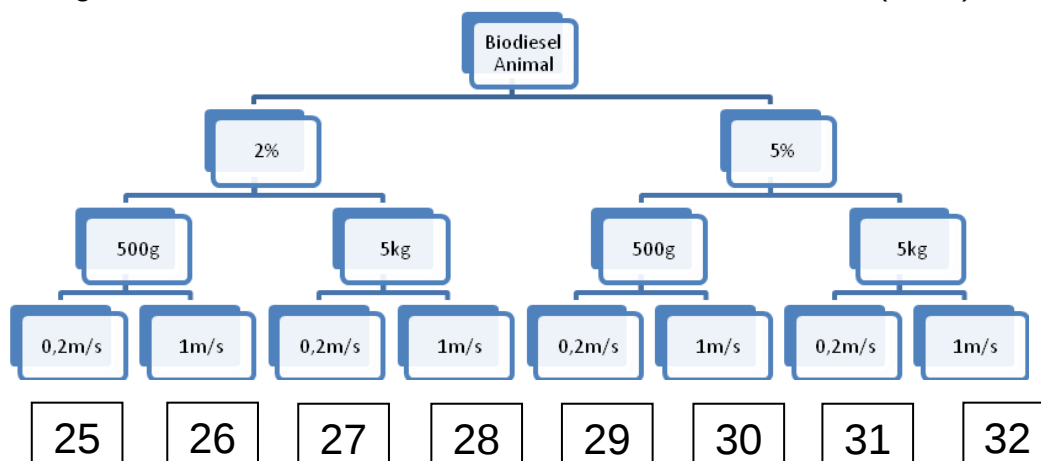
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 48 - Ensaio com o contaminante Biodiesel Vegetal (Girassol) + Animal (Sebo).



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 49 - Ensaio com o contaminante Biodiesel Animal (Sebo).



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Os ensaios simularam 4 quilômetros cada um, correspondendo no caso da velocidade ser de 0,2m/s à 5h e 33min e no caso da velocidade de 1m/s à 1h e 6min, levando em conta que a trajetória percorrida pelo pino no disco corresponde a um diâmetro de 15,75 mm.

As rotações foram monitoradas através de um tacômetro da marca Oppama modelo Pet - 2000 DX.

O lubrificante utilizado para a lubrificação do artefato experimental (que foi contaminado com biodiesel), tem classificação API CF SAE 40. A tabela 9 descreve as propriedades físico-químicas do lubrificante em questão.

Tabela 9 - Propriedades físico-químicas do lubrificante API CF SAE 40.

Marca	Petrobrás
Modelo	Lubrax MD-400 API CF SAE 40
Ponto de fulgor (°C)	262
Ponto de fluidez (°C)	-6
Viscosidade (40 °C) [cSt]/[SSU]	163,5/ 757,6
Viscosidade (100 °C) [cSt]/[SSU]	15,46/ 71,6
Índice de Viscosidade	95
Cinzas Sulfatadas (%peso)	1,18
Índice de Basicidade Total (mgKOH/g)	11,4

Fonte: PETROBRÁS (2009).

Após as amostras serem ensaiadas no equipamento de Pin-on- disk como descrito anteriormente, as mesmas foram analisadas através de vários processos e aparelhos, um deles é o depositador rotativo de partículas (RPD), o processo de como decorre este tipo de análise é descrito a seguir.

3.1 Depositador Rotativo de Partículas- RPD

O depositador rotativo de partícula trabalha separando as partículas presentes em amostras de óleo pela ação de forças magnéticas, centrífugas e gravitacionais que atuam sobre as mesmas. Ao fim do procedimento as partículas são depositadas sobre uma lamina de vidro formando três anéis concêntricos.

Os anéis são relativos ao tamanho das partículas, sendo que partículas maiores (50-200 μ m) se depositaram no anel interno, medias (10-50 μ m) no anel médio e partículas pequenas (1-10 μ m) no anel externo.

As especificações técnicas do RPD é mostrado na tabela 10 e o aparelho na Figura 50.

Tabela 10 - Especificações do depositador rotativo de partículas.

Fabricante	Kittiwake Developments Ltda
Tensão nominal	110 / 240 V
Frequência	47 a 63 Hz
Potência	75 Watts
Dimensões	360 x 360 x 450 mm
Peso	5,5 Kg
Velocidade de rotação	0 – 200 rpm (4 velocidades pré fixadas)

Fonte: Kittiwake Developments (2012).

Figura 50 - Depositador rotativo de partículas.



Fonte: Kittiwake Developments (2012).

3.1.1 Processo de confecção de amostras no RPD

Primeiramente o óleo que será analisado deve ser aquecido a 60° C para que se diminua a sua viscosidade e se possa trabalhar em melhores condições no aparelho de RPD. Para isso usou-se um forno elétrico onde se pode controlar a velocidade de variação da temperatura interna, a temperatura final do forno e o tempo que ele deve permanecer nesse patamar. O forno utilizado foi o EGD 7000 mostrado na figura 51.

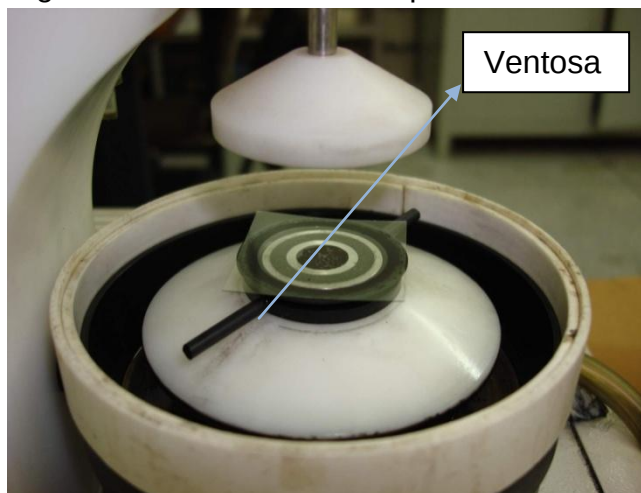
Figura 51 - Forno elétrico.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Posteriormente posiciona-se a lâmina de vidro na ventosa de borracha do RPD e faz-se pressão através do dispositivo de acrílico do aparelho para que a lâmina fique segura pela ventosa de borracha, conforme Figura 52.

Figura 52 - Lâmina de vidro presa à ventosa.

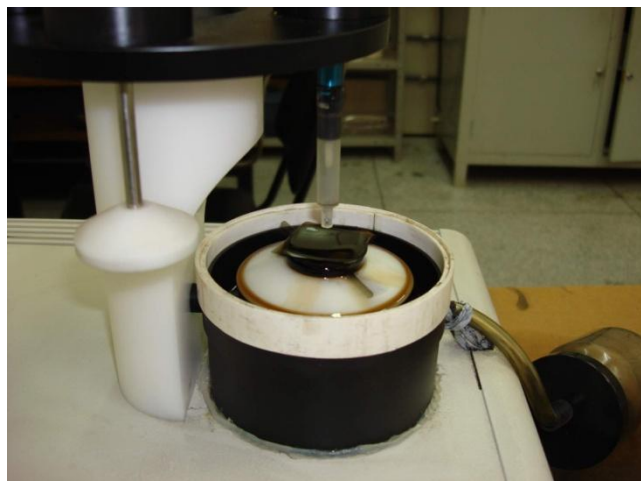


Fonte: Elaboração do próprio autor.

Assim que a amostra de óleo que está no forno atingir a temperatura adequada para os testes (60°C), deve-se com o auxílio de luvas resgatar o béquer do forno e agitar o conteúdo do mesmo com um bastão de vidro, para que a amostra fique homogênea e as partículas a serem analisadas fiquem suspensas no meio. Deste modo as partículas que se quer analisar voltam em suspensão no meio líquido já que estavam decantadas por terem uma densidade diferente do 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 vagarosamente, conforme figura 53.

Figura 53 - Óleo lubrificante colocado sobre a lâmina de vidro girando à 70 rpm.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

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.

Deste modo deve-se repetir todo o processo para obtenção de cada lâmina. Como foram realizados 32 testes, houve um total de 32 ferrogramas.

3.2 Ferrografia Quantitativa

A ferrografia quantitativa consiste na quantificação do tamanho e número de partículas em suspensão no óleo lubrificante, que é coletado do aparato em questão. Através desta técnica podem-se obter informações sobre o grau de severidade do desgaste presente no objeto a ser analisado através do acompanhamento contínuo, geralmente visto através de uma "trend line".

A quantificação é feita utilizando-se o contador de partículas (PQA), que permite quantificar as partículas ferromagnéticas de modo rápido e objetivo.

Essa técnica, inicialmente usada no controle de fluidos em satélites e naves espaciais, foi gradativamente estendida a sistemas hipercríticos, hidrostáticos, hidráulicos, e outros.

O acompanhamento da máquina, por meio da ferrografia quantitativa, possibilita a construção de gráficos, análises de tendências, assim permitindo analisar e intervir se necessário quando há condições de maior severidade.

3.2.1 Monitor de Partículas Ferrosas

Na análise de partículas ferromagnéticas foi utilizado o monitor de partículas ferrosas PQA, que pode ser visto na figura 54 e cujas especificações estão na tabela 11. O PQA é um magnetômetro com duas bobinas organizadas de forma que a bobina localizada na parte da amostra (sensor) e a bobina de referência estão em equilíbrio quando não há nenhuma amostra no sensor, nem interferência eletromagnética externa. O sistema é projetado para assegurar cuidadosamente que ambas as bobinas respondam igualmente às mudanças de temperatura no 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 é exibido como um "índice" de PQ; isto relaciona diretamente à massa das partículas ferromagnéticas na amostra.

Figura 54 - Monitor automático de partículas.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

O PQA é diretamente controlado por botões montados no painel dianteiro ou remotamente do teclado de um computador PC associado. Uma exibição alfanumérica no painel dianteiro do PQA permite a seleção de modos alternativos de operação e dá uma exibição local dos dados do índice de PQ depois de cada medida. Dados de um grupo de amostras são armazenados na memória do PQA.

Tabela 11 - Especificação do monitor automático de partículas.

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

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Primeiramente a amostra é agitada vigorosamente para que as partículas decantadas pelo efeito da gravidade e do tempo estejam homogeneizadas e suspensas no lubrificante em questão, posteriormente são colocadas amostras coletadas de 2ml em um recipiente especial, através de uma pipeta; após isso, estes recipientes são fechados com a tampa apropriada e colocados para medição no "case" do aparelho. Depois de medida, cada pote é entregue a uma calha de disposição. Entre as medidas a calibração do PQA é verificada automaticamente contra um padrão conhecido montado permanentemente debaixo do carrossel de medida.

O valor obtido no teste permite acompanhar a evolução do quadro (progressão ou estabilidade) em relação a esse tipo de material de desgaste não havendo, no entanto, identificação de características morfológicas e dimensões das partículas.

A medida da PQ é uma ferramenta essencial no programa de análise de óleo porque pode identificar partículas ferrosas de tamanho maior do que 5-10 μm , que em outras técnicas de análise não é possível sem uma prévia preparação da amostra. O índice PQ corresponde a presença de partículas de ferro e níquel na amostra.

3.3 Viscosímetro

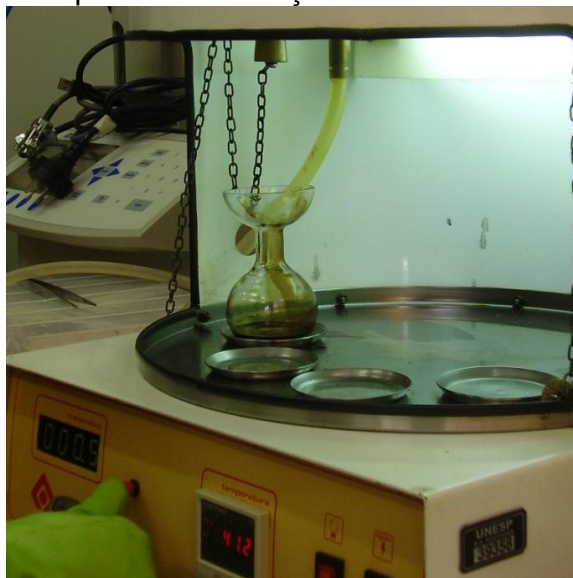
A viscosidade foi realizada no viscosímetro Saybolt. É um equipamento utilizado para se medir a viscosidade em unidades Saybolt; sendo um equipamento de fácil manuseio, podendo ser visto na figura 55. O processo consiste em colocar o óleo a ser verificado em um banho de aquecimento; onde é aquecido até uma temperatura de 40°C. Após esse primeiro aquecimento o óleo é escoado através de um furo, localizado abaixo das rolhas que se podem visualizar na figura 56. Ao mesmo tempo em que começa o escoamento, dispara-se o cronômetro, e deixa-se o óleo escoar até que atinja a marca de 60 ml do Becker, como visto na figura 56. O tempo que levar para que aconteça esse escoamento é o valor da viscosidade em Saybolt em 40°C. Após esta medição, repete-se toda a operação de aquecimento em outro recipiente do viscosímetro, porém com a temperatura em 100°C. O óleo deste novo recipiente é solto através da rolha, o cronômetro do aparelho é iniciado e só é parado assim que o óleo atinja a marca de 60ml do Becker. Este valor mostrado no cronômetro é o valor da viscosidade Saybolt a 100°C. Com esses valores de viscosidade, é possível traçar a curva de viscosidade do óleo lubrificante e também achar o valor do índice de viscosidade do óleo em questão.

Figura 55 - Viscosímetro Saybolt.



Fonte: Quimis (2012).

Figura 56 - Aparato de medição do viscosímetro Saybolt.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

3.4 Ponto de Fulgor

O ponto de fulgor é a temperatura na qual os vapores liberados pelo óleo entram em ignição. O teste experimental realizado para o ponto de fulgor foi feito em um aparelho de vaso aberto, da marca Cleveland, que pode ser visto na Figura 57. Vale salientar que o teste foi feito dentro de uma capela, para que os vapores

provenientes do óleo lubrificante em questão não contaminem o ambiente de trabalho.

Figura 57 - Equipamento de ponto de fulgor dentro de uma capela.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Para se fazer a análise do ponto de fulgor das amostras contaminadas, foram seguidos os procedimentos da norma ASTM D-92, onde uma das principais características desse ensaio está na capacidade de determinar o nível de contaminação por combustível ou outro tipo de contaminante líquido. Além disso, auxilia na determinação correta do lubrificante, levando em consideração o ambiente e condições de trabalho no qual este será submetido. Para o ensaio é necessário realizar alguns passos, como sucintamente descritos a seguir:

- a) Deixar a amostra homogênea;
- b) Depositar a amostra no recipiente do equipamento;
- c) Aquecer gradativamente o óleo e monitorar a temperatura via termômetro de tubo de mercúrio;
- d) Acender a chama do equipamento, passar rapidamente sobre o vapor do óleo lubrificante, o processo pode ser visualizado na figura 58.
- e) Ao primeiro lampejo de chama, anotar a temperatura e comparar com o valor de fulgor descrito na ficha técnica do óleo lubrificante novo.

Figura 58 - Aparato e procedimento do ponto de fulgor.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Através da observação do resultado do ponto de fulgor é possível tirar algumas conclusões, sendo que se o resultado obtido for muito abaixo do estipulado na ficha técnica do lubrificante, pode indicar a contaminação do óleo por combustíveis, porém, se o ponto de fulgor obtido for superior ao fornecido pela ficha técnica do lubrificante, é indício de alguma contaminação por insolúveis ou contaminantes líquidos com ponto de fulgor superior.

3.5 Ferrosκόpio

O microscópio óptico ou ferrosκόpio caracteriza uma das fases mais importantes na análise do óleo lubrificante, ele é utilizado para analisar a morfologia e o tamanho das partículas existentes no lubrificante. A caracterização é feita a partir dos ferrogramas provenientes do ensaio de RPD, estes ferrogramas foram analisados minuciosamente para a detecção de partículas.

Neste projeto foi utilizado o microscópio óptico da marca OLYMPUS, modelo BX 41 denominado ferrosκόpio.

Para avaliar a morfologia das partículas ferrosas das amostras realizadas no RPD, as amostras foram fotografadas com aumentos de 100 e 500 vezes.

A figura 59 mostra o microscópio óptico utilizado nos ensaios.

Figura 59 - Microscópio OLYMPUS BX 41.



Fonte: Spach Optics (2012).

3.6 TBN

A análise TBN foi realizada segundo a norma NBR 05798 pelo método potenciométrico. O aparelho utilizado foi o titulador HI 902 da empresa Hanna, conforme Figura 60.

Figura 60 - Titulador potenciométrico HI902.



Fonte: Hanna Instruments (2012).

O processo de Titulação foi feito seguindo os seguintes passos:

a) Solvente de titulação

- 500ml de tolueno (toluol);
- 500ml de Clorofórmio ;
- 15ml de água destilada.

b) Limpeza da Bureta

- A bureta foi enxaguada 3 vezes com água destilada e depois 5 vezes com Ácido Hidroclorídrico (0.1M em 2-propanol). De um ensaio para outro se enxaguou a bureta para não haver contaminação.

c) Limpeza do Eletrodo

- Drenou-se o eletrólito de dentro do eletrodo e preencheu-se o mesmo com novo eletrólito. Repetiu-se este procedimento no mínimo 3 vezes e, por fim, deixou-se cheio de eletrólito (LiCl em 2- propanol).

d) Calibração do Eletrodo

- Há a necessidade de se calibrar o eletrodo no começo de cada ensaio. Para tal colocaram-se as soluções tampão (buffer) 4.01 e 7.01 dentro de recipientes apropriados;
- Colocou-se o eletrodo dentro da solução 4.01 e verificou-se o valor permanecia na faixa de 177.5mV (+/- 5%), equivalente a 20 mV;
- Colocou-se o eletrodo dentro da solução 7.01 e verificou-se o valor permanecia na faixa de 0 (+/-5%), equivalente a -20mV.

e) Preparação da amostra

- Pesou-se 5 g de amostra de óleo;
- Colocou-se esta quantidade pesada e 100ml de solvente de titulação dentro de um Becker de 250ml;
- Colocou-se o Becker sobre o agitador e a barra magnética misturadora dentro do Becker.

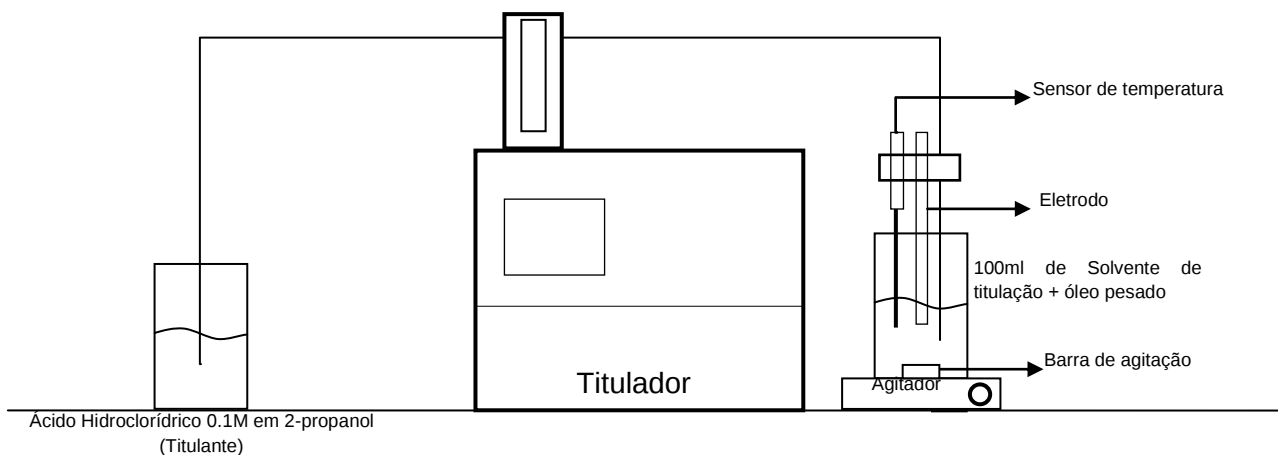
f) Titulação potenciométrica

- Antes de começar a titulação ligou-se o agitador magnético por pelo menos 90 segundos para que a amostra ficasse homogênea.
- Inseriram-se o sensor de temperatura, o eletrodo e o tubo dispensador no Becker de modo que não tocasse na barra de agitação;
- Colocou-se a linha do eletrodo 5 a 6 mm abaixo do nível da amostra + solvente de titulação;

Todo o aparato utilizado é exposto conforme Figura 61.

Esperou-se que o aparelho fizesse a titulação automaticamente e fornecesse um gráfico e um resultado.

Figura 61 - Aparato do experimento de TBN.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

3.7 Espectrômetro de Raio-X

3.7.1 Preparação das amostras

Devido a grande quantidade de amostras ensaiadas (32), não foi possível proceder a análise de todas, já que os custos envolvidos seriam demasiadamente altos. Portanto a escolha das amostras foi feita levando-se em conta a severidade dos ensaios, ou seja, as amostras escolhidas foram as que rodaram com 5 Kg e velocidade de 1m/s, totalizando 8 amostras.

Antes de fazer o teste no aparelho de espectrometria foi necessário a preparação das amostras, sendo que o aparelho precisa de no mínimo 12ml de óleo lubrificante para se obter uma medição precisa; como havia disponível somente amostras com volume de óleo entre 1 e 3 ml, houve a necessidade de se utilizar um óleo que seja neutro às análises, não interferindo nos resultados obtidos, para o preenchimento das amostras de óleo lubrificante a fim de se obter os 12ml. O óleo mineral puro utilizado foi o NUJOL, e as quantidades utilizadas são mostradas na tabela 12.

Tabela 12 - Peso de óleo e diluente.

Amostra	Massa do óleo [g]	Massa de Diluente (nujol) [g]	MassaTotal [g]
4	1,52	11,85	13,37
8	1,88	10,99	12,87
12	1,86	11,46	13,32
16	2,16	11,84	14
20	1,87	10,38	12,25
24	1,72	11,25	12,97
28	1,82	11,95	13,77
32	1,78	12,35	14,13

Fonte: Elaboração do próprio autor.

As amostras preparadas podem ser vistas na figura 62, que mostra os recipientes em que as amostras foram testadas. Estes recipientes são feitos de cilindros de alumínio, onde debaixo do mesmo é colocado um filme específico da XRF, para que os raios-X entrem por ele, faça a leitura das amostras e volte ao receptor do aparelho.

Figura 62 - Amostras preparadas.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

3.7.2 Ensaio no Espectrômetro de Raio-X

O aparelho utilizado foi o Espectrômetro de Raio-X da marca "Oxford" modelo "X-Supreme" que pode ser visto na figura 63. As amostras devidamente preparadas conforme descrito no item anterior são colocadas nos espaços reservados do aparelho, de modo que se pode fazer todas as medições sem ter a

necessidade de abrir a tampa. O aparelho funciona com o sistema operacional Windows XP e opera segundo um próprio programa para análise. Depois de colocadas as amostras há a necessidade de fazer a varredura de todos os tempos mortos de cada amostra, para uma maior precisão no resultado. Finalmente recolhe-se o gráfico de espectro e a tabela com os resultados analíticos do aparelho.

Figura 63 - Espectrômetro de Raio-X.

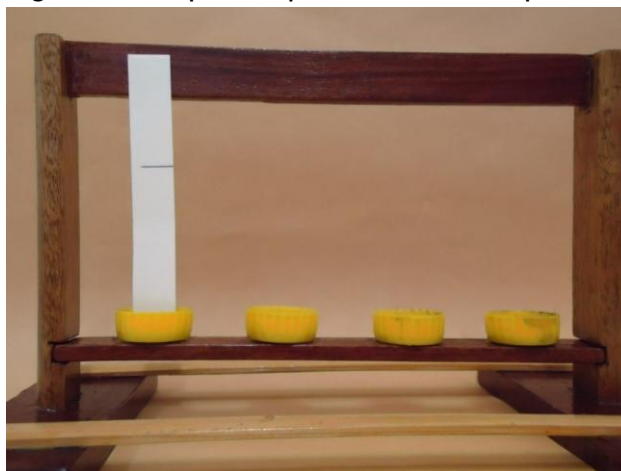


Fonte: Elaboração do próprio autor.

3.8 Teste de Dispersão

O teste de dispersão consiste na análise de que se no óleo lubrificante o aditivo de dispersão ainda está presente e atuante. Para este teste o lubrificante é colocado em contato com uma fita especial que pode ser vista na figura 64, sendo que o lubrificante é colocado em um espaço próprio para seu armazenamento.

Figura 64 - Aparato para teste de dispersão.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Deste modo, o lubrificante se mostra eficiente se após contato com o lubrificante e ao passar 24h deste contato, o mesmo chegar em uma demarcação na borda superior da fita.

3.9 Tratamento com calor

Os ferrogramas feitos através do procedimento 2.2.1 de RPD foram esquentados no aquecedor, que pode ser visto na figura 65, a temperatura utilizada foi de 330°C. As placas eram pegas com uma pinça para que não houvesse o risco de queimaduras e nem queda dos ferrogramas. Posteriormente foram colocadas em cima do aquecedor, onde ficaram durante 90 segundos. Este tempo e esta temperatura são padrão para o tipo de material que se quer analisar nesta dissertação.

Figura 65 - Aparato do processo de aquecimento.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Após este procedimento os ferrogramas são analisados através do microscópio óptico ou ferrograma, para a identificação das partículas.

3.10 Análise de mudança de cor

Como foi discutido na revisão bibliográfica, o óleo pode mudar de coloração durante o uso, ou no teste laboratorial, sendo assim houve a análise da coloração do óleo para a verificação de quais fatores poderiam mudar o mesmo. Esta análise foi feita utilizando uma luminária que foi posta por baixo de cada amostra, uma câmera para a obtenção das fotos e um suporte no qual a câmera foi fixada.

4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÃO

As peças utilizadas foram fabricadas na oficina do departamento de Engenharia Mecânica da UNESP, através de dois tarugos, um de aço 8640 e outro de aço 4140, o disco e o pino utilizados nos testes em laboratório do equipamento de Pin-on-Disk podem ser visualizados na figura 66.

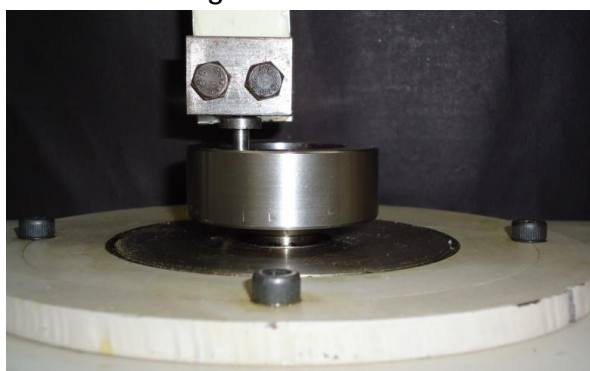
Figura 66 - À esquerda está o disco em forma de copo, feito de aço 8640, à direita está o pino de aço 4140.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A montagem do aparato do equipamento de pin-on-disk pode ser visto através da figura 67.

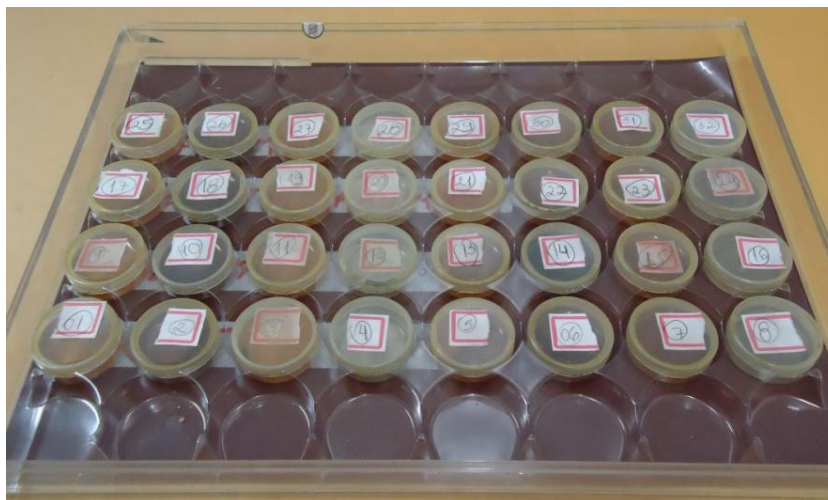
Figura 67 - Montagem do sistema PIN-ON-DISK.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Os óleos retirados após a realização dos ensaios foram armazenados em pequenos copos conforme figura 68.

Figura 68 - Amostras coletadas dos ensaios em PIN-ON-DISK.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Depois de finalizada a etapa dos ensaios, foi possível obter uma comparação visual dos desgastes ocorridos com o uso de lubrificantes contaminados com diesel e biodiesel. Uma questão a ser destacada é que após cada ensaio realizado, foi avaliada a massa do pino e do copo, e apesar de que a olho nú o desgaste pode ser bem percebido, a massa do copo e do pino praticamente não sofreram mudanças.

4.1 Rugosidade

A Figura 69 mostra o rugosímetro utilizado para obtenção dos valores da tabela 13.

Figura 69 - Aparato do teste de rugosidade.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 13 - Tabela com medidas e valores médios de rugosidade do disco e pino.

	Medida 1 [μm]	Medida 2 [μm]	Medida 3 [μm]	Rugosidade Média (Ra) [μm]
Disco	4,19	4,25	4,58	4,34
Pino	1,85	1,99	1,81	1,88

Fonte: Elaboração do próprio autor.

4.2 Viscosidade Saybolt

A seguir são apresentados os resultados das viscosidades Saybolt para cada contaminação introduzida no lubrificante, assim como suas respectivas porcentagens. Esta análise foi feita antes do ensaio do lubrificante no equipamento PIN-ON-DISK, pois é necessário 60 ml de óleo lubrificante para a realização do mesmo. Os valores das viscosidades obtidas são apresentados na tabela 14.

Tabela14 - Valores de Viscosidade Saybolt para cada tipo de contaminação.

Óleo Lubrificante	Contaminação	Viscosidade Saybolt	
		40° C	100° C
Biodiesel B5	2%	642,3	79,3
	5%	503,9	68,1
Biodiesel Vegetal (Girassol)	2%	559,5	78,5
	5%	501,2	72,0
Biodiesel Animal (Sebo)	2%	665,9	83,2
	5%	557,7	72,5
Biodiesel Animal + Vegetal	2%	620,2	88,6
	5%	496,3	69,8

Fonte: Elaboração do próprio autor.

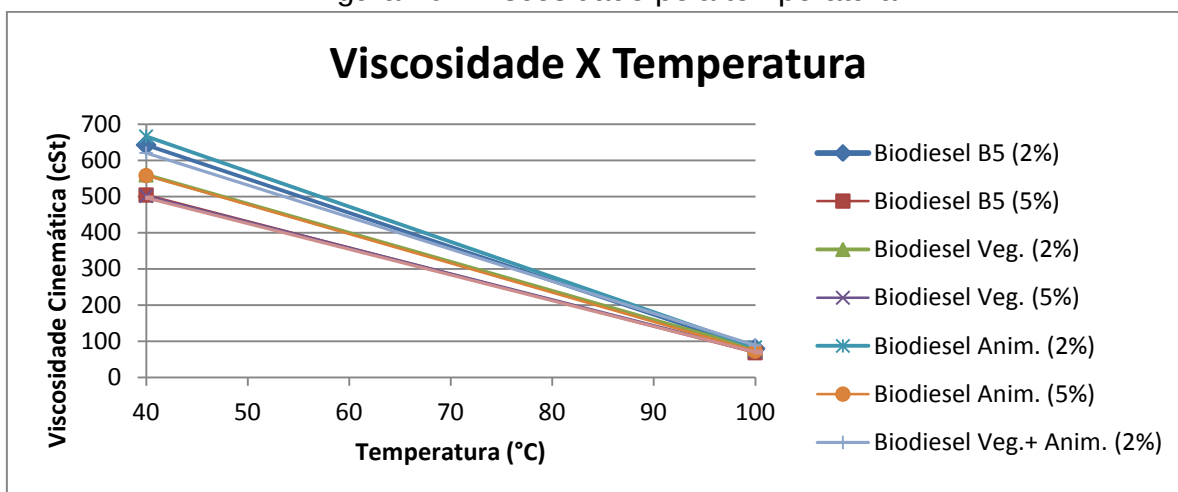
Nesta análise verifica-se que quanto maior a contaminação, menor será a viscosidade do lubrificante. Este efeito coincide com o esperado pela literatura, já que o biodiesel é menos viscoso. Pode-se melhor observar os efeitos das contaminações no óleo lubrificante à temperatura de 40°C do que à 100°C. Este

efeito poderá ser melhor discutido no próximo item, o qual trata do índice de viscosidade.

4.3 Índice de viscosidade

Para demonstrar como a temperatura afeta diretamente a viscosidade do óleo lubrificante e também para uma melhor verificação de resultados, a figura 70 expõe as curvas de decaimento da viscosidade para cada tipo de contaminação conforme o aumento da temperatura, mostrando de forma clara que quanto maior a contaminação no óleo lubrificante maior será o seu decaimento na curva da viscosidade.

Figura 70 - Viscosidade pela temperatura.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

O cálculo do índice de viscosidade é feito através das medidas da viscosidade à 40°C e à 100°C em cSt . Os valores calculados são mostrados na tabela 15.

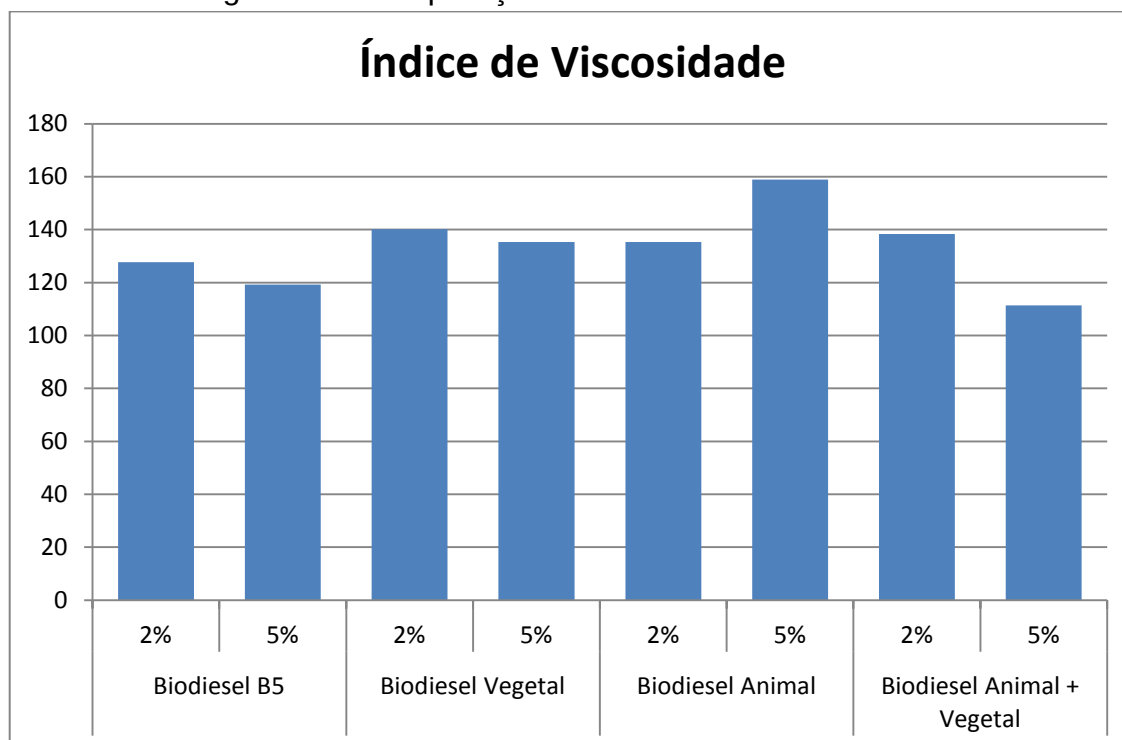
Tabela 15 - Valores de índice de viscosidade.

Óleo Lubrificante SAE 40 com contaminação de:	Contaminação	Índice de Viscosidade
Biodiesel B5	2%	127,68
	5%	119,2
Biodiesel Vegetal	2%	140,1
	5%	135,3
Biodiesel Animal	2%	135,3
	5%	158,9
Biodiesel Animal + Vegetal	2%	138,4
	5%	111,4

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Através de um gráfico de barras é possível se obter uma melhor comparação dos resultados, a figura 71 mostra que para o biodiesel animal quanto maior a contaminação, maior será o índice de viscosidade, já para o restante das contaminações os resultados diferem do primeiro, demonstrando que quanto maior a contaminação menor será o índice de viscosidade.

Figura 71 - Comparação entre os índices de viscosidade.



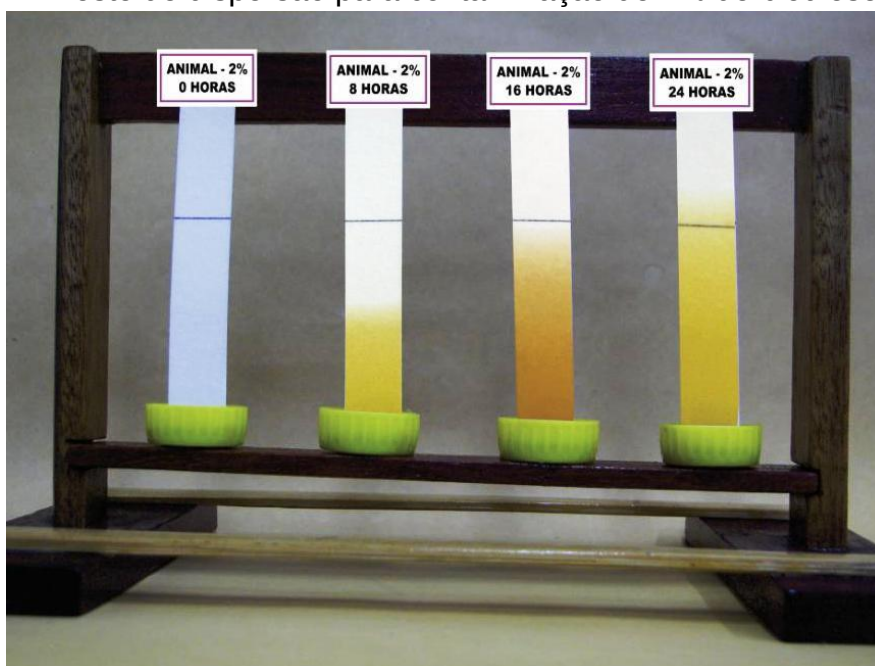
Fonte: Elaboração do próprio autor.

4.4 Aditivo de Dispersão

Para saber se o aditivo de dispersão ainda é presente no óleo lubrificante mesmo após sua contaminação com os vários tipos de biodieseis, foram realizados os ensaios de dispersão. Estes ensaios são realizados através do contato da fita especial de teste de dispersão com o óleo lubrificante, as fitas são dispostas verticalmente e deixadas em repouso absoluto. Se o óleo atingir a marca na fita após 24 horas, o aditivo de dispersão ainda se encontra eficiente.

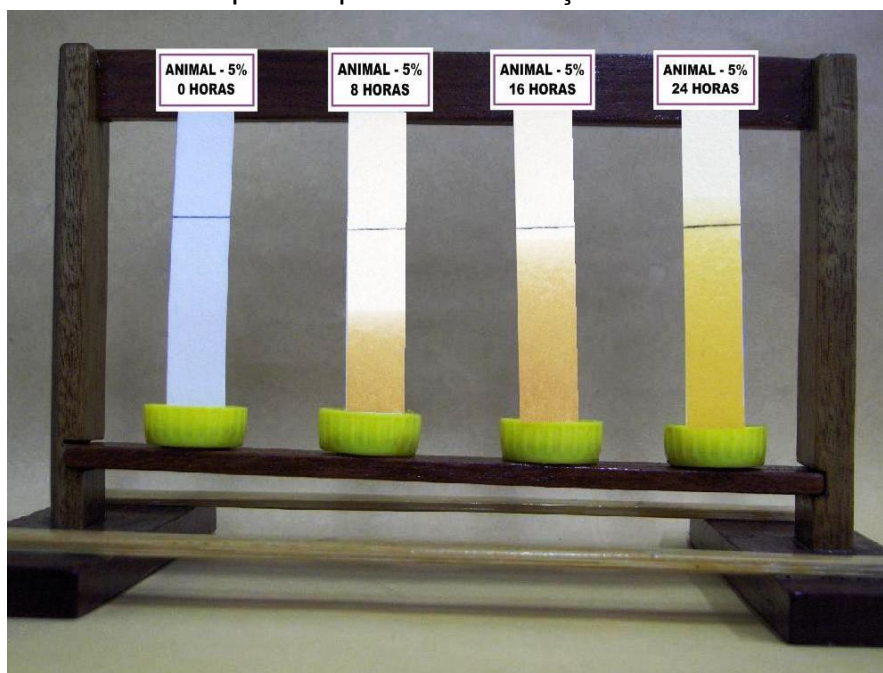
Para uma melhor visualização do decorrer do teste, foram tiradas fotos a cada 8 horas. Desta forma é possível que se tenha uma melhor ideia de como o óleo sobe através da fita. As figuras de 72 a 79 demonstram este processo.

Figura 72 - Teste de dispersão para contaminação de 2% de biodiesel animal.



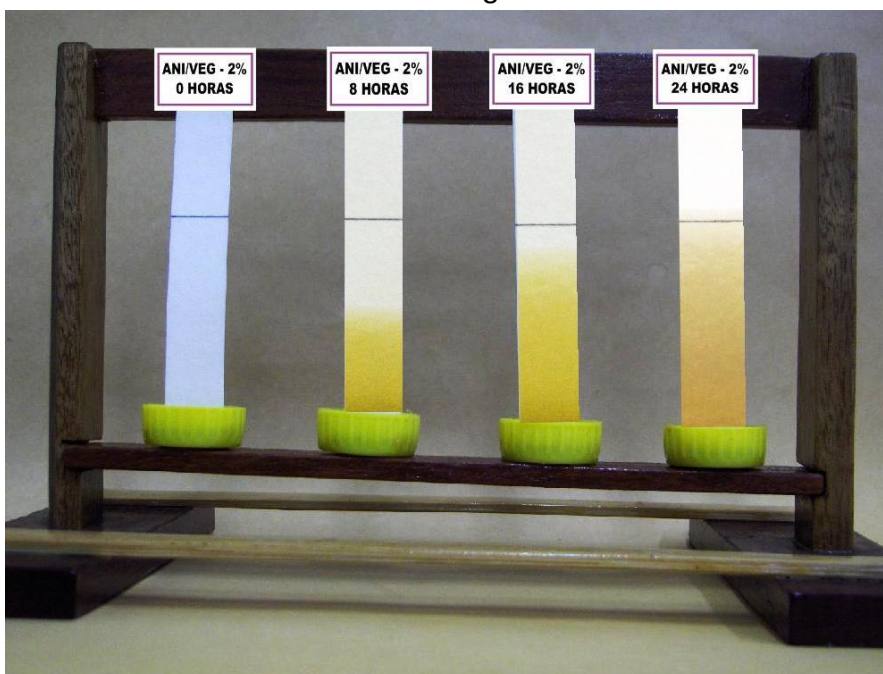
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 73 - Teste de dispersão para contaminação de 5% de biodiesel animal.



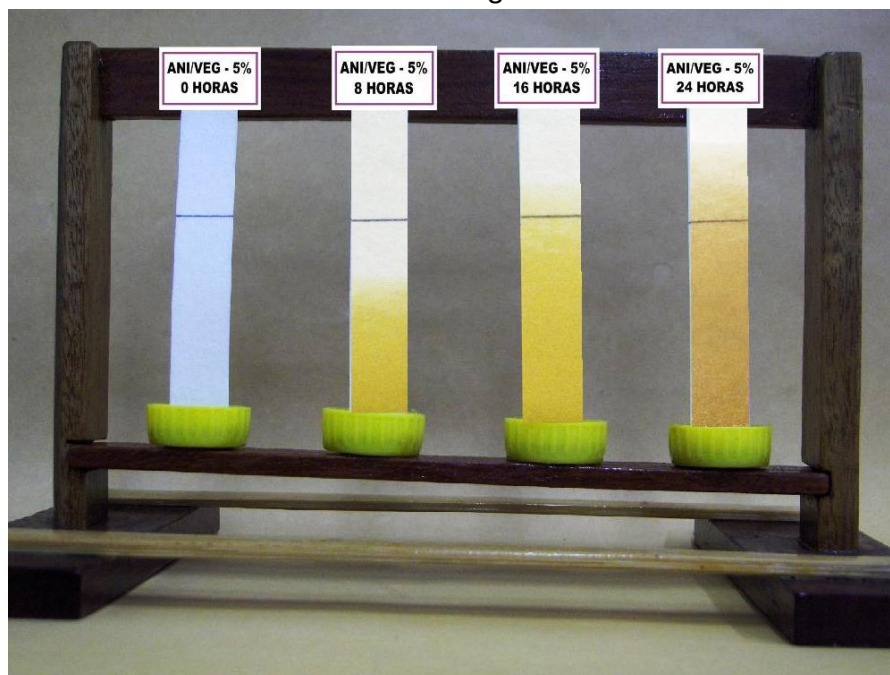
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 74 - Teste de dispersão para contaminação de 2% de biodiesel animal+vegetal.



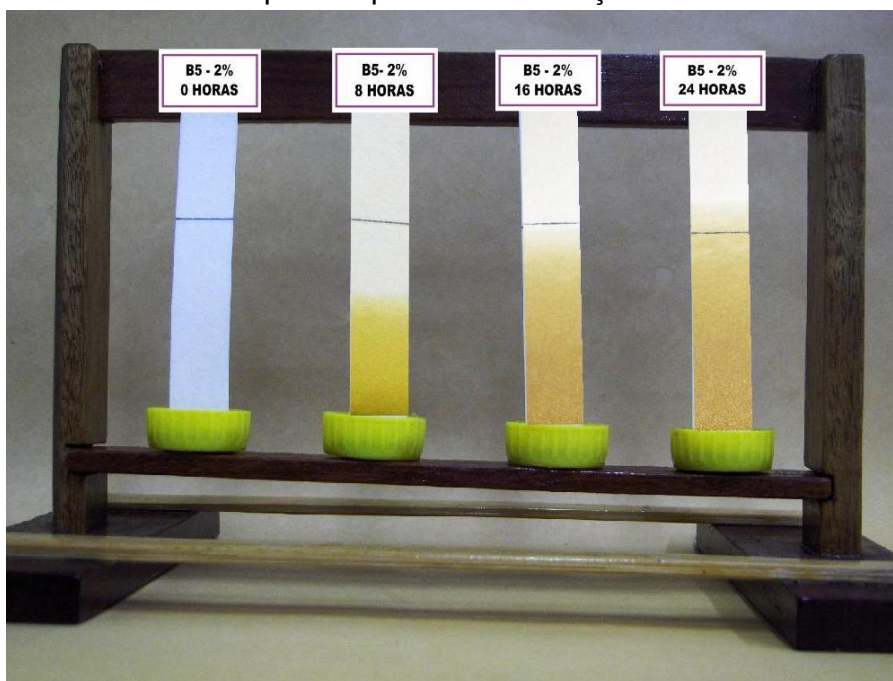
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 75 - Teste de dispersão para contaminação de 5% de biodiesel animal+vegetal.



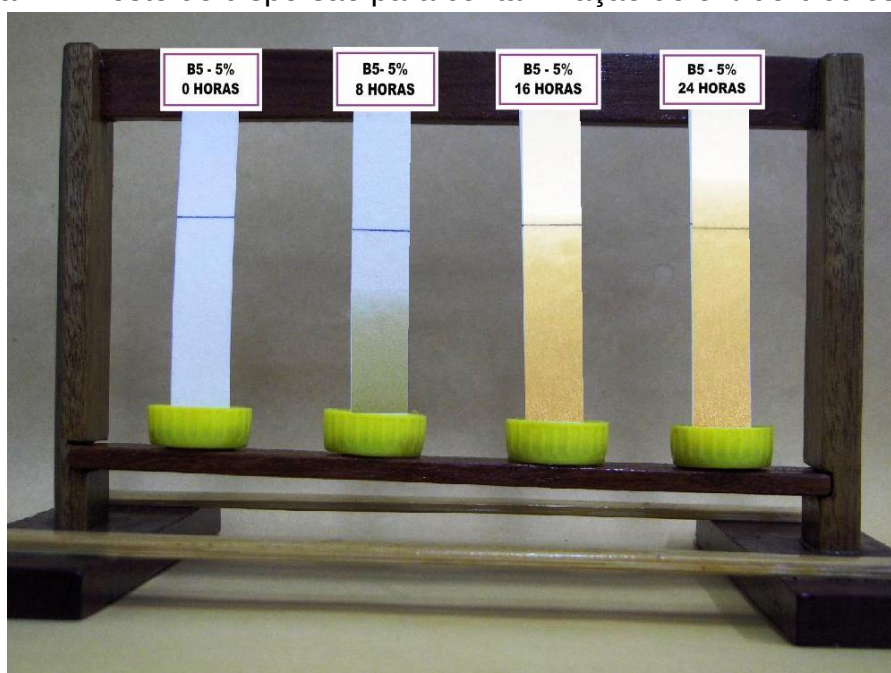
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 76 - Teste de dispersão para contaminação de 2% de biodiesel B5.



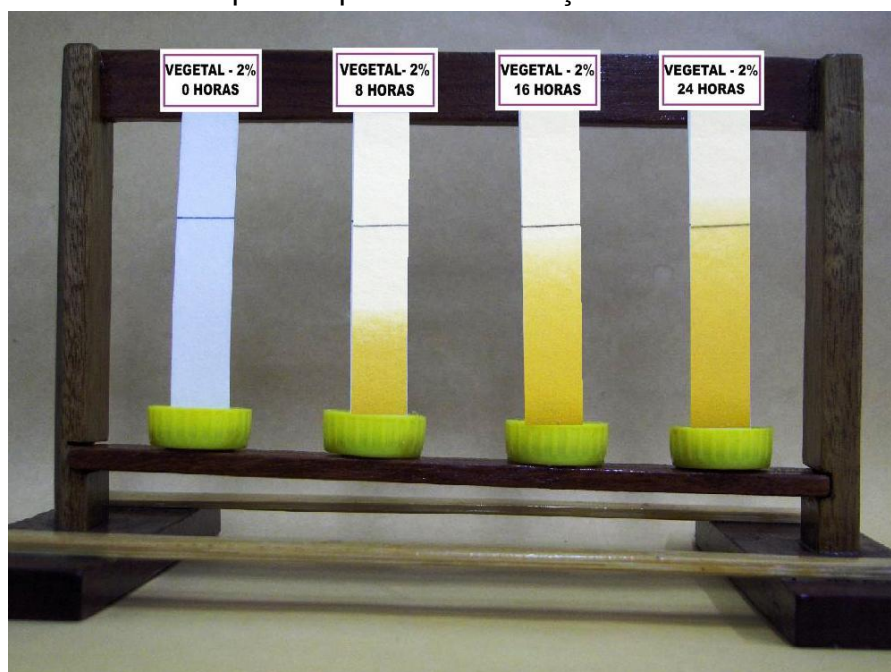
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 77 - Teste de dispersão para contaminação de 5% de biodiesel B5.



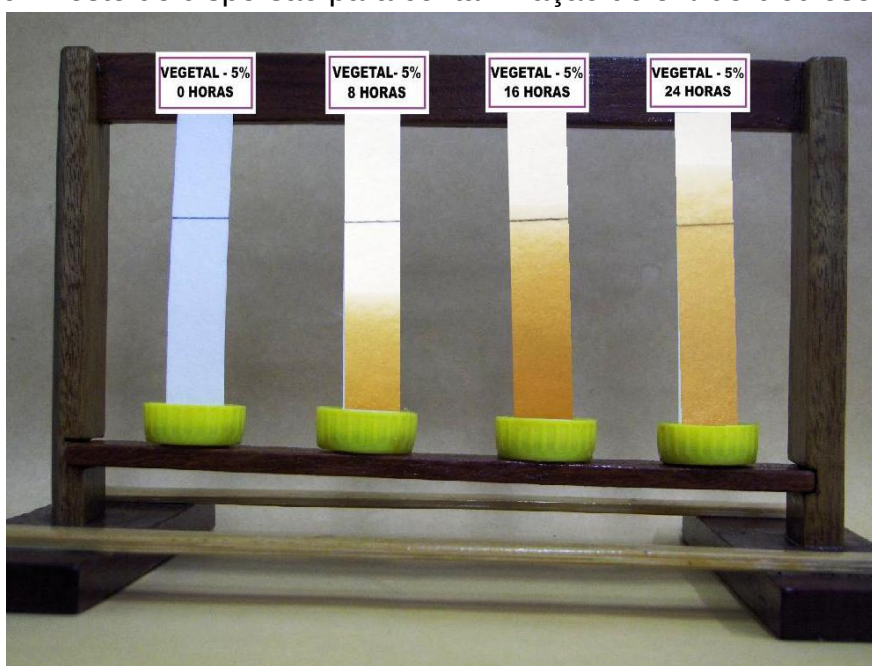
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 78 - Teste de dispersão para contaminação de 2% de biodiesel vegetal.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 79 - Teste de dispersão para contaminação de 5% de biodiesel vegetal.



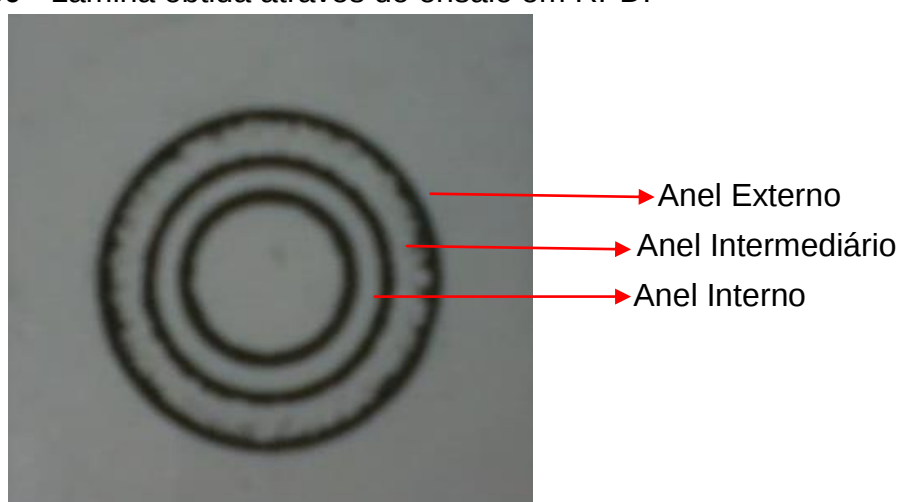
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Portanto, através do teste de dispersão verifica-se que o aditivo de dispersão está presente e ativo em todos os tipos de contaminações no óleo lubrificante.

4.5 Ferrografia Analítica

O RPD separou as partículas ferromagnéticas em uma lâmina de vidro em três anéis concêntricos. Sendo que o anel interno possui as maiores, o intermediário as médias e o externo as menores partículas, conforme a figura 80.

Figura 80 - Lâmina obtida através do ensaio em RPD.



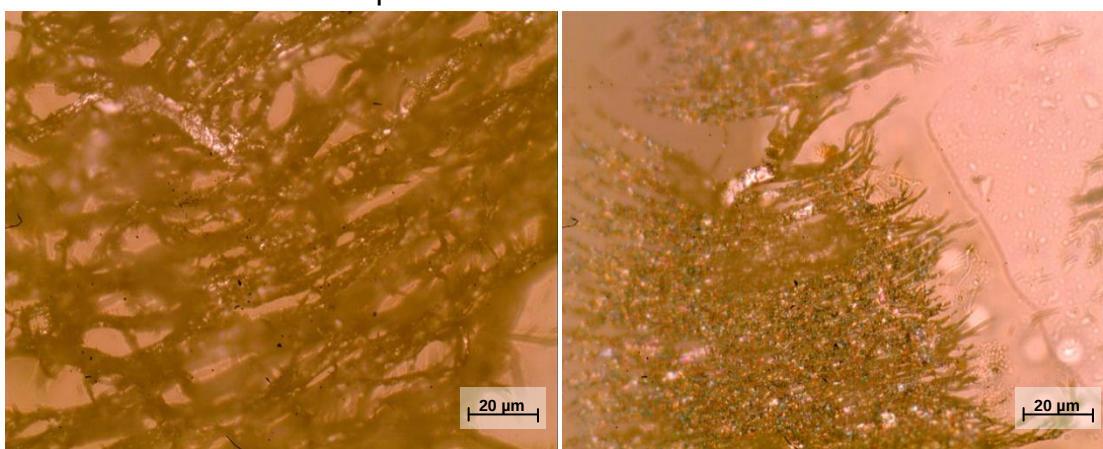
Fonte: Elaboração do próprio autor.

As partículas encontradas para cada tipo de ensaio (velocidade e carga) e cada tipo de contaminação usada no lubrificante são apresentadas na figura 81 à 96. Lembrando que as fotografias tiradas correspondem às partículas do anel interno, ou seja, às maiores partículas.

➤ **Contaminação com Biodiesel B5 (2%):**

- Carga com o peso de 5Kg.

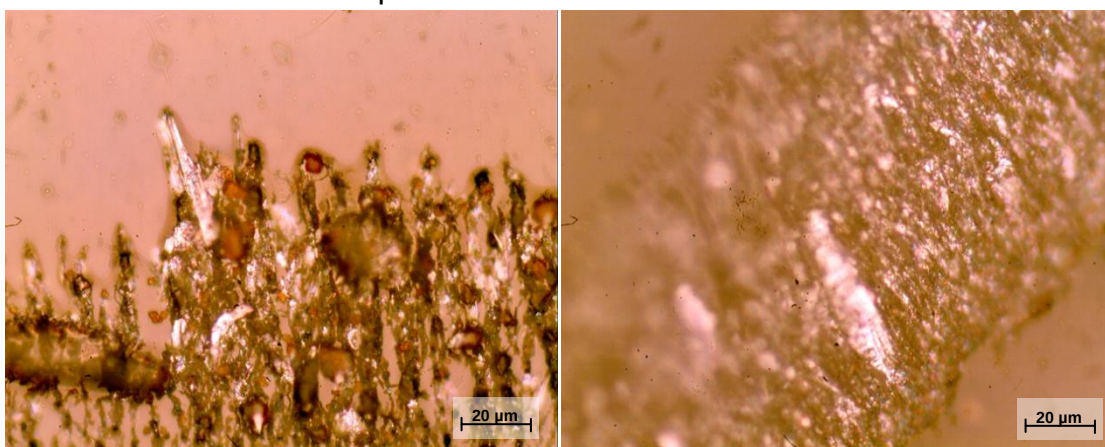
Figura 81 - Do lado esquerdo é exposta a lâmina de $V = 0,2\text{m/s}$ e do lado direito é exposta a lâmina de $V = 1\text{m/s}$.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

- Carga com o peso de 500g.

Figura 82 - Do lado esquerdo é exposta a lâmina de $V = 0,2\text{m/s}$ e do lado direito é exposta a lâmina de $V = 1\text{m/s}$.

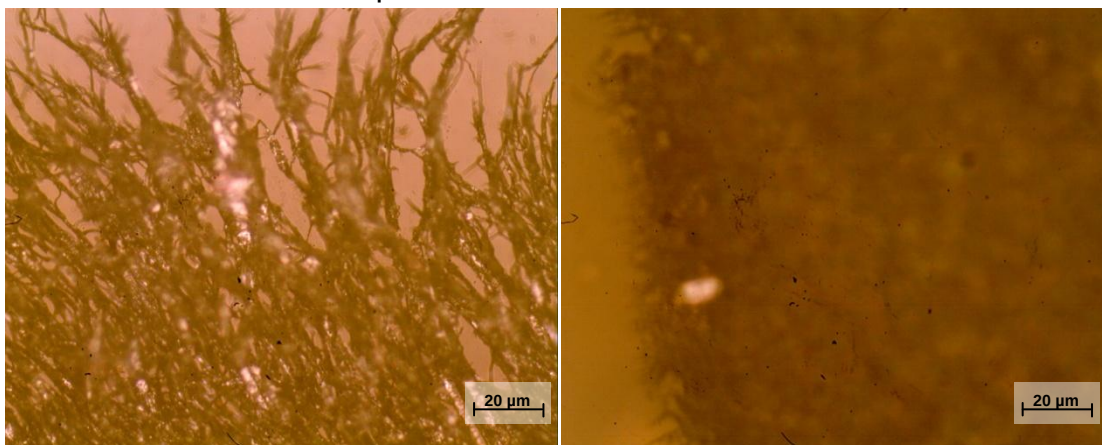


Fonte: Elaboração do próprio autor.

➤ **Contaminação com Biodiesel B5 (5%):**

- Carga com o peso de 5Kg.

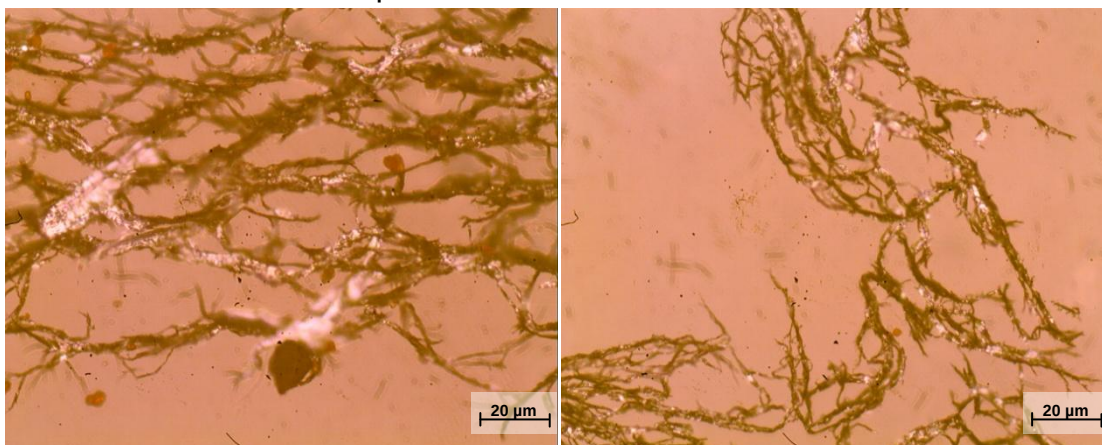
Figura 83 - Do lado esquerdo é exposta a lâmina de $V = 0,2\text{m/s}$ e do lado direito é exposta a lâmina de $V = 1\text{m/s}$.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

- Carga com o peso de 500g.

Figura 84 - Do lado esquerdo é exposta a lâmina de $V = 0,2\text{m/s}$ e do lado direito é exposta a lâmina de $V = 1\text{m/s}$.

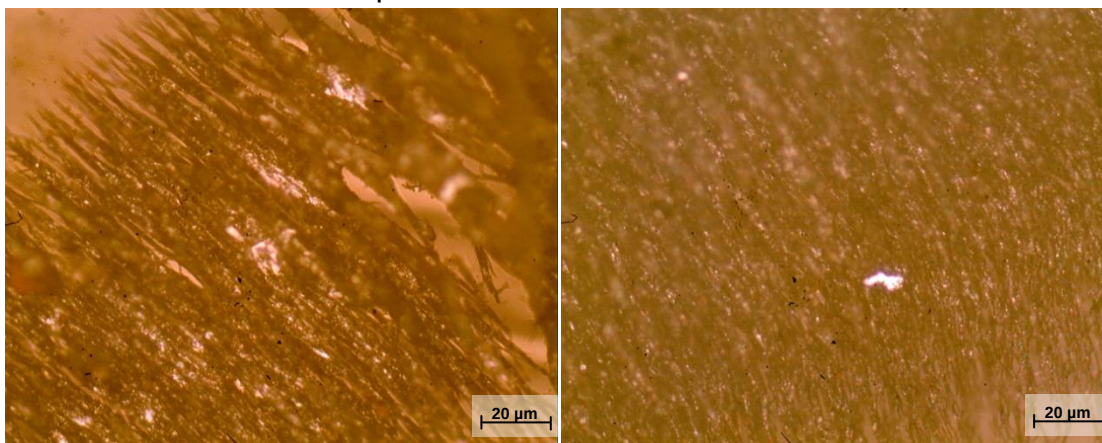


Fonte: Elaboração do próprio autor.

➤ **Contaminação com Biodiesel Animal (2%):**

- Carga com o peso de 5 Kg.

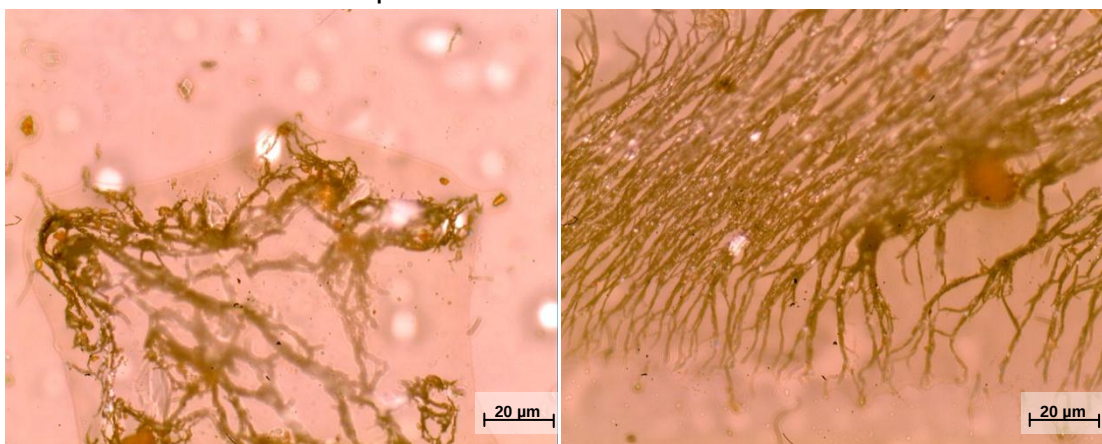
Figura 85 - Do lado esquerdo é exposta a lâmina de $V = 0,2\text{m/s}$ e do lado direito é exposta a lâmina de $V = 1\text{m/s}$.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

- Carga com o peso de 500g.

Figura 86 - Do lado esquerdo é exposta a lâmina de $V = 0,2\text{m/s}$ e do lado direito é exposta a lâmina de $V = 1\text{m/s}$.

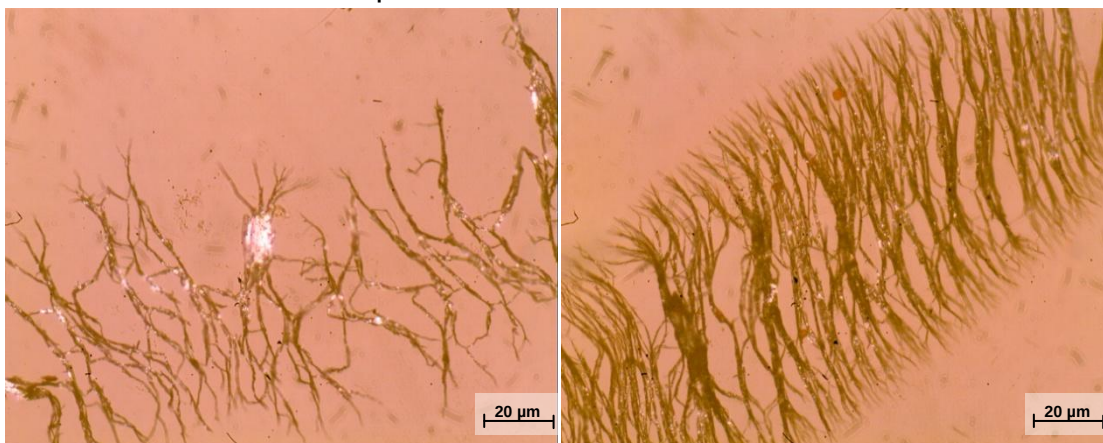


Fonte: Elaboração do próprio autor.

➤ **Contaminação com Biodiesel Animal (5%):**

- Carga com o peso de 5Kg.

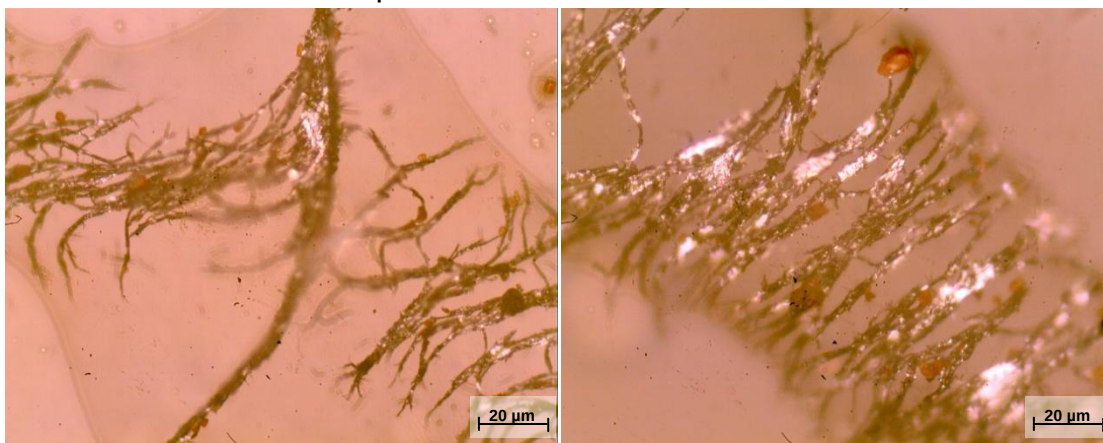
Figura 87 - Do lado esquerdo é exposta a lâmina de $V = 0,2\text{m/s}$ e do lado direito é exposta a lâmina de $V = 1\text{m/s}$.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

- Carga com o peso de 500g.

Figura 88 - Do lado esquerdo é exposta a lâmina de $V = 0,2\text{m/s}$ e do lado direito é exposta a lâmina de $V = 1\text{m/s}$.

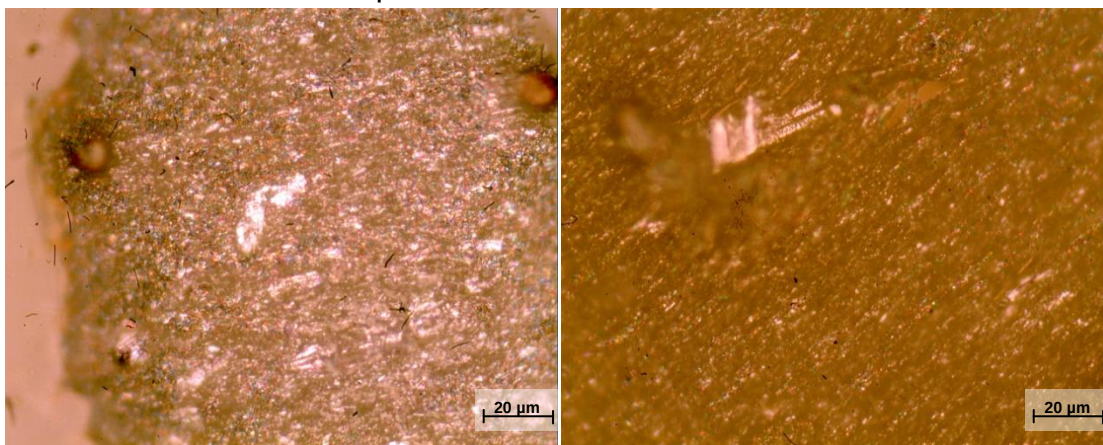


Fonte: Elaboração do próprio autor.

➤ **Contaminação com Biodiesel Vegetal (2%):**

- Carga com o peso de 5Kg.

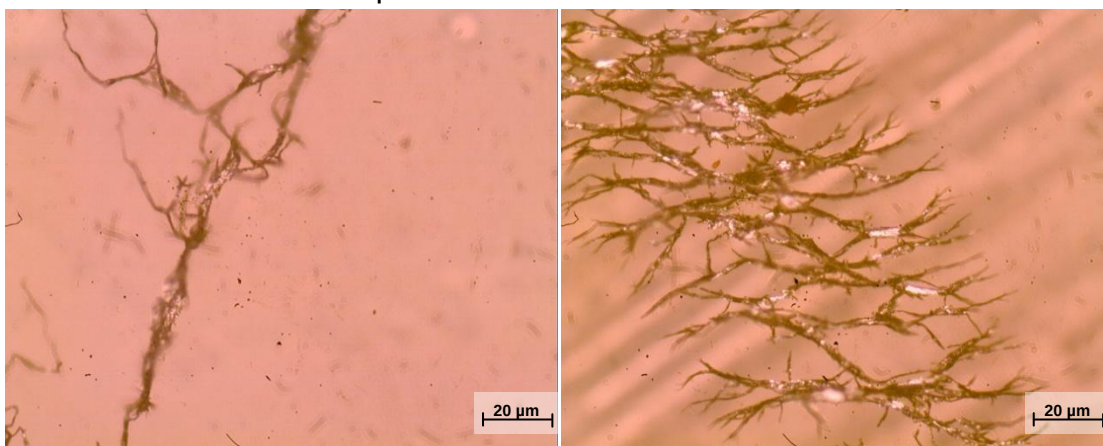
Figura 89 - Do lado esquerdo é exposta a lâmina de $V = 0,2\text{m/s}$ e do lado direito é exposta a lâmina de $V = 1\text{m/s}$.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

- Carga com o peso de 500g.

Figura 90 - Do lado esquerdo é exposta a lâmina de $V = 0,2\text{m/s}$ e do lado direito é exposta a lâmina de $V = 1\text{m/s}$.

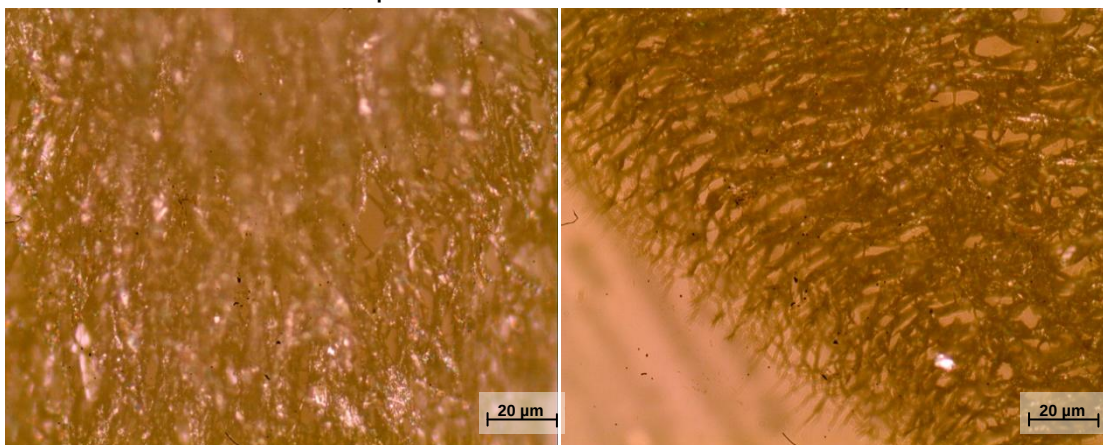


Fonte: Elaboração do próprio autor.

➤ **Contaminação com Biodiesel Vegetal (5%):**

- Carga com o peso de 5Kg.

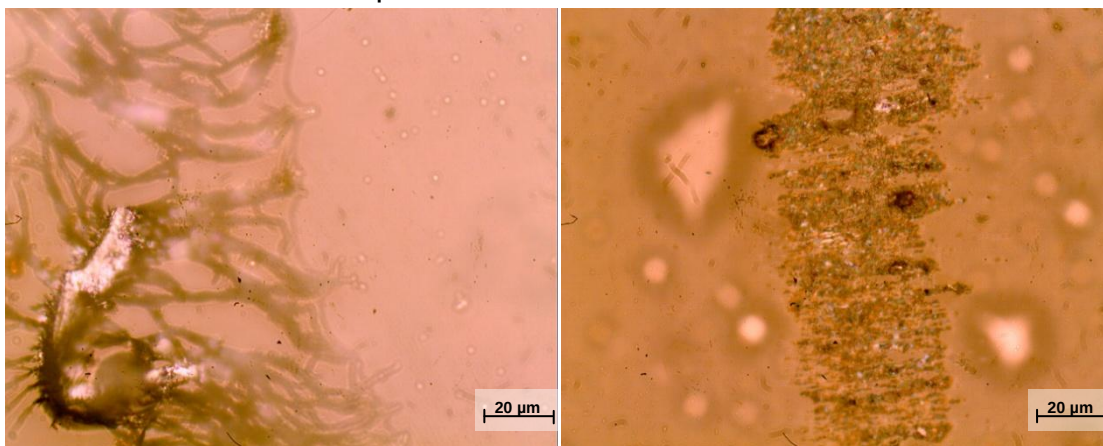
Figura 91 - Do lado esquerdo é exposta a lâmina de $V = 0,2\text{m/s}$ e do lado direito é exposta a lâmina de $V = 1\text{m/s}$.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

- Carga com o peso de 500g.

Figura 92 - Do lado esquerdo é exposta a lâmina de $V = 0,2\text{m/s}$ e do lado direito é exposta a lâmina de $V = 1\text{m/s}$.

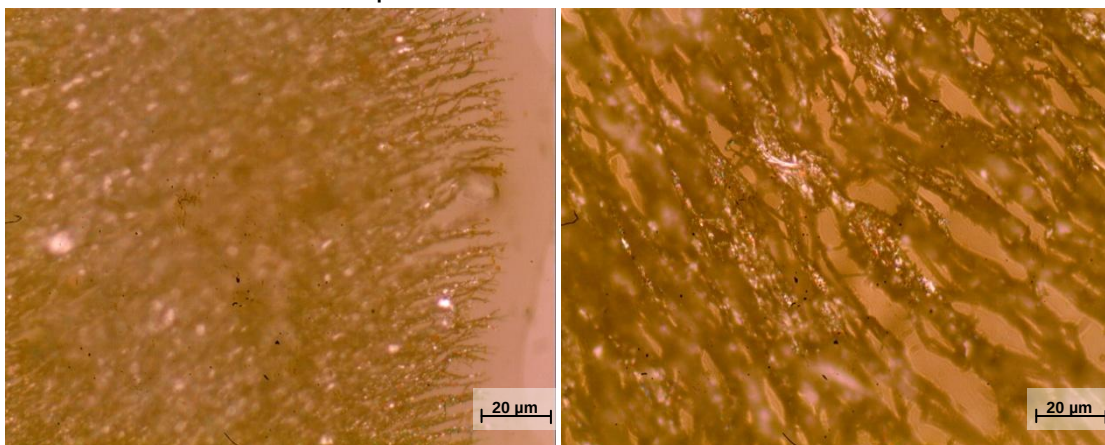


Fonte: Elaboração do próprio autor.

➤ **Contaminação com Biodiesel Animal + Vegetal (2%)**

- Carga com o peso de 5Kg.

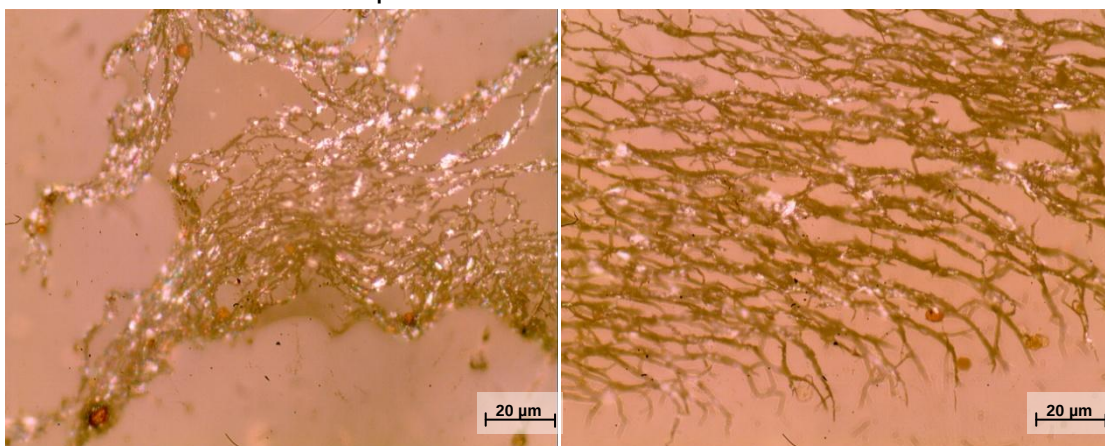
Figura 93 - Do lado esquerdo é exposta a lâmina de $V = 0,2\text{m/s}$ e do lado direito é exposta a lâmina de $V = 1\text{m/s}$.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

- Carga com o peso de 500g.

Figura 94 - Do lado esquerdo é exposta a lâmina de $V = 0,2\text{m/s}$ e do lado direito é exposta a lâmina de $V = 1\text{m/s}$.

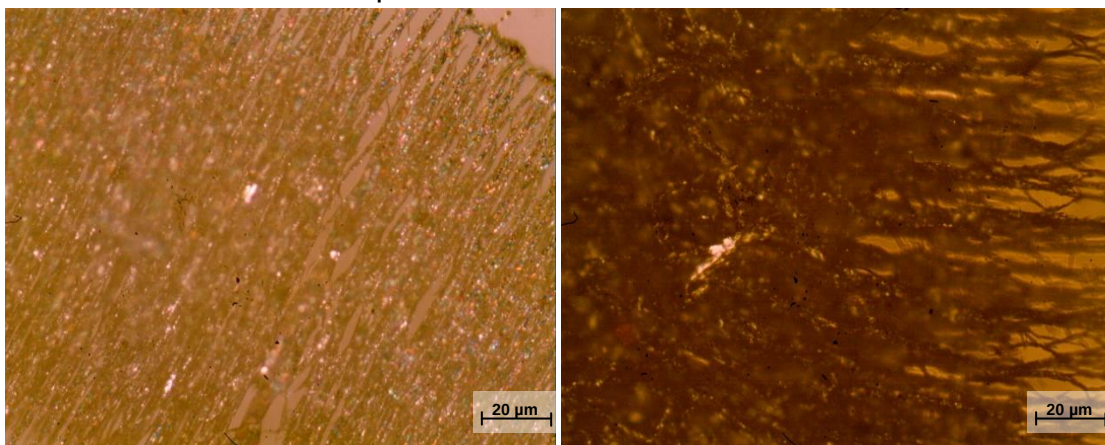


Fonte: Elaboração do próprio autor.

➤ **Contaminação com Biodiesel Animal + Vegetal (5%):**

- Carga com o peso de 5Kg.

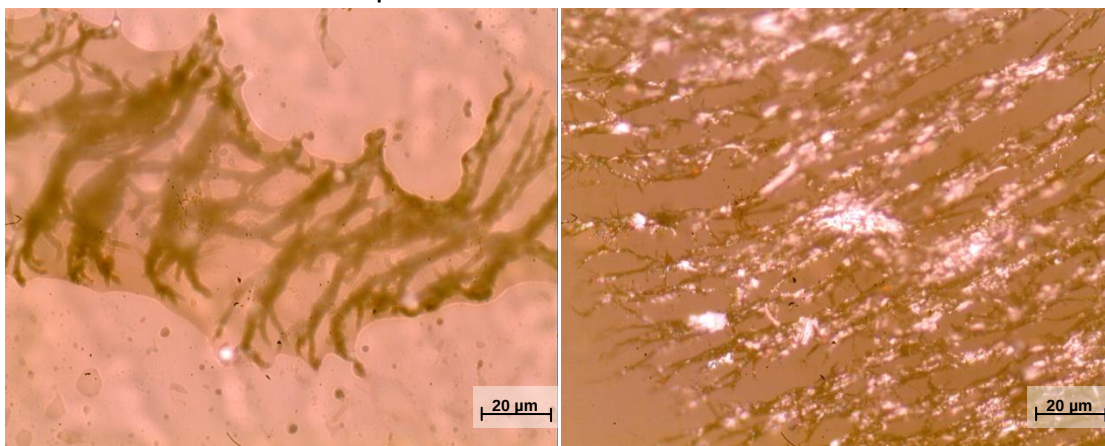
Figura 95 - Do lado esquerdo é exposta a lâmina de $V = 0,2\text{m/s}$ e do lado direito é exposta a lâmina de $V = 1\text{m/s}$.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

- Carga com o peso de 500g.

Figura 96 - Do lado esquerdo é exposta a lâmina de $V = 0,2\text{m/s}$ e do lado direito é exposta a lâmina de $V = 1\text{m/s}$.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Observa-se nesta análise, um desgaste normal com algumas partículas de óxidos. Não há evidência de desgaste excessivo.

4.6 Heating

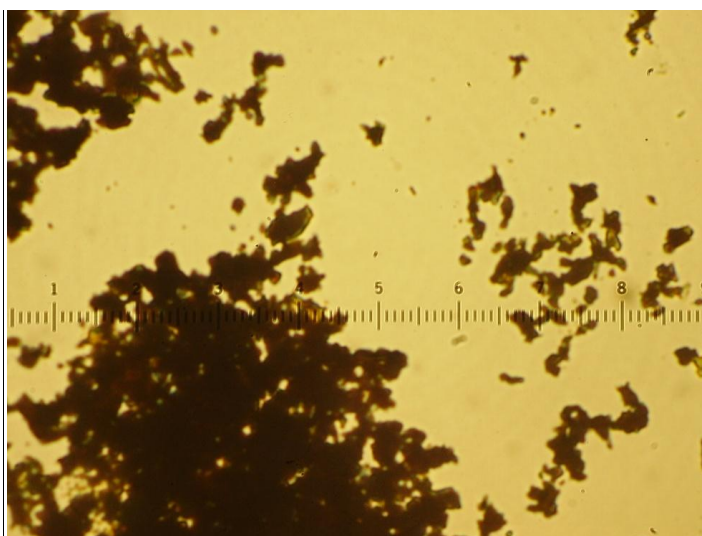
Os ferrogramas foram expostos à 330 °C por 90 segundos e posteriormente foram feitas as fotos nos mesmos. A análise consiste em se observar no microscópio de qual material é feito as partículas de desgaste, encontradas nos ferrogramas.

As fotos realizadas no microscópio são expostas nas figuras de 97 à 111, juntamente com suas condições de teste. Vale salientar também que a menor escala da régua corresponde à 2μm para um aumento de 500X e à 1μm para um aumento de 1000X.

➤ **Contaminação com Biodiesel B5 (2%):**

- Carga com o peso de 5Kg e velocidade de 1m/s.

Figura 97 - Ferrograma após aquecimento com zoom de 500X.

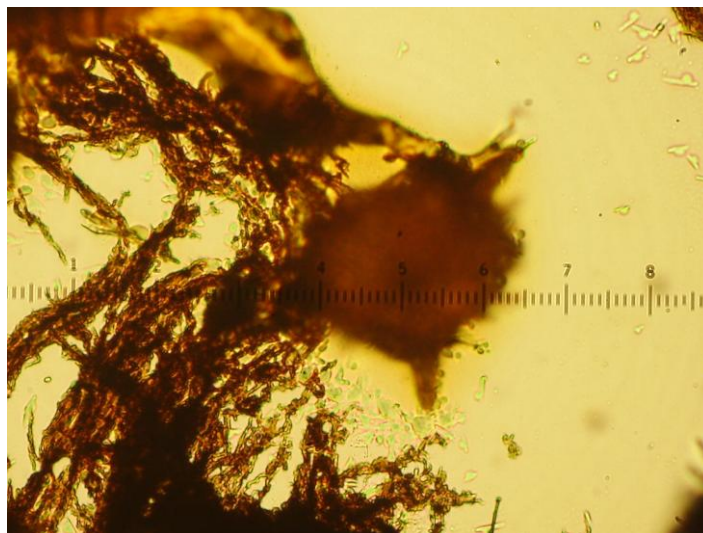


Fonte: Elaboração do próprio autor.

➤ **Contaminação com Biodiesel B5 (5%):**

- Carga com o peso de 5Kg e velocidade de 0.2m/s.

Figura 98 - Ferrograma após aquecimento com zoom de 500X.

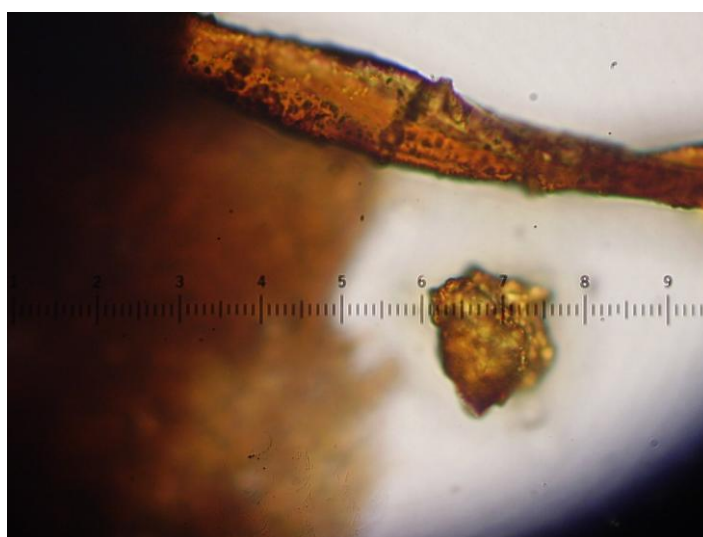


Fonte: Elaboração do próprio autor.

➤ **Contaminação com Biodiesel B5 (5%):**

- Carga com o peso de 5Kg e velocidade de 1m/s.

Figura 99 - Ferrograma após aquecimento com zoom de 500X.

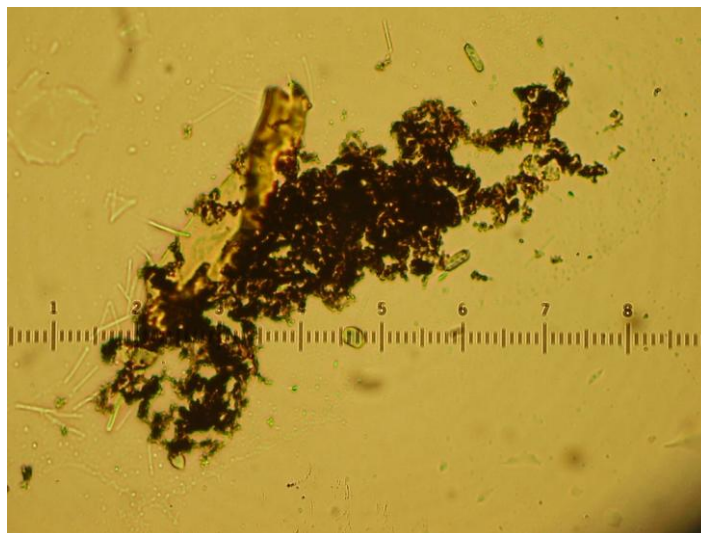


Fonte: Elaboração do próprio autor.

➤ **Contaminação com Biodiesel B5 (5%):**

- Carga com o peso de 500g e velocidade de 0.2m/s.

Figura 100 - Ferrograma após aquecimento com zoom de 500X.

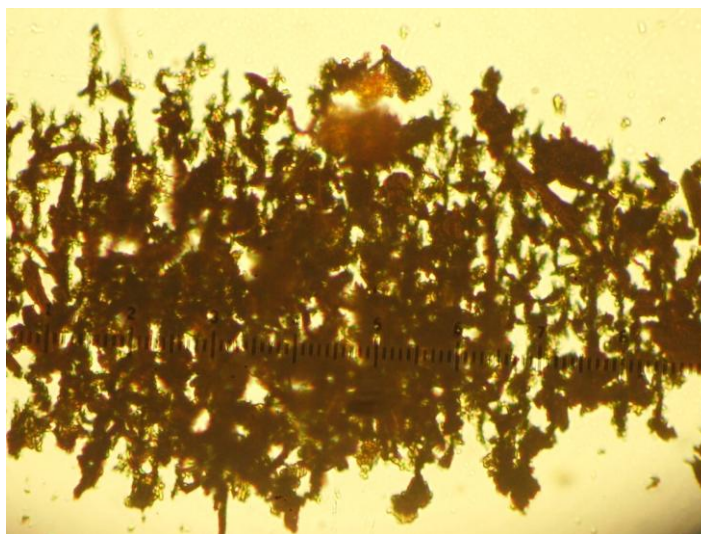


Fonte: Elaboração do próprio autor.

➤ **Contaminação com Vegetal (2%):**

- Carga com o peso de 5Kg e velocidade de 0.2m/s.

Figura 101 - Ferrograma após aquecimento com zoom de 500X.

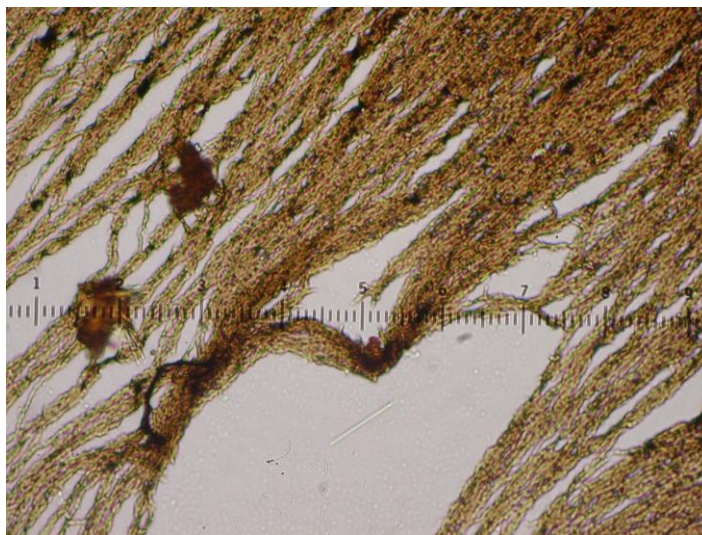


Fonte: Elaboração do próprio autor.

➤ **Contaminação com Vegetal (2%):**

- Carga com o peso de 5Kg: $V=1\text{m/s}$.

Figura 102 - Ferrograma após aquecimento com zoom de 500X.

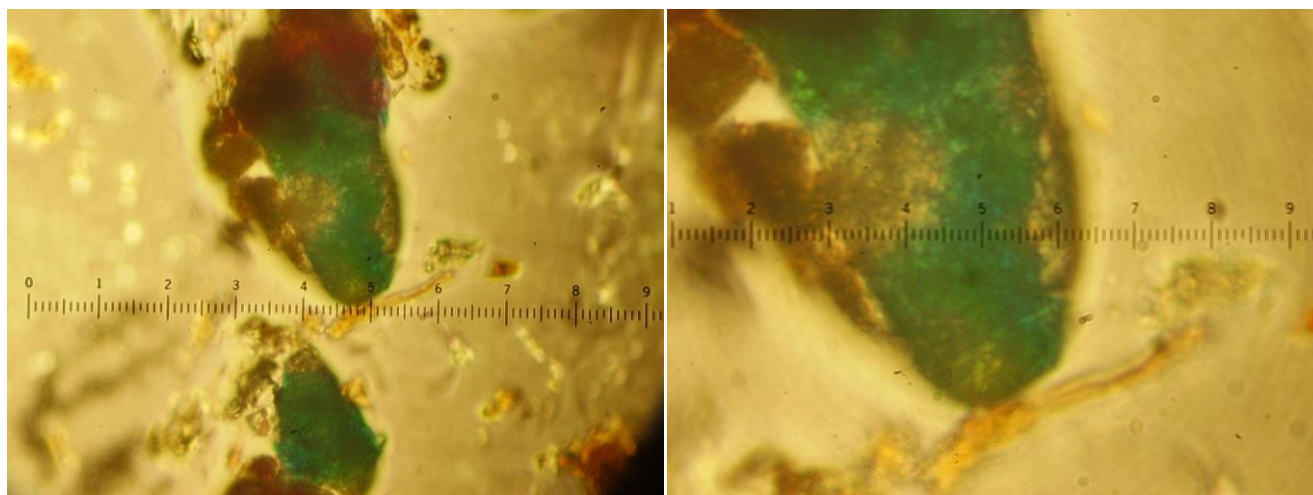


Fonte: Elaboração do próprio autor.

➤ **Contaminação com Vegetal (5%):**

- Carga com o peso de 500g e velocidade de 0.2m/s .

Figura 103 - Ferrograma após aquecimento com zoom de 500X à esquerda e zoom de 1000X à direita.

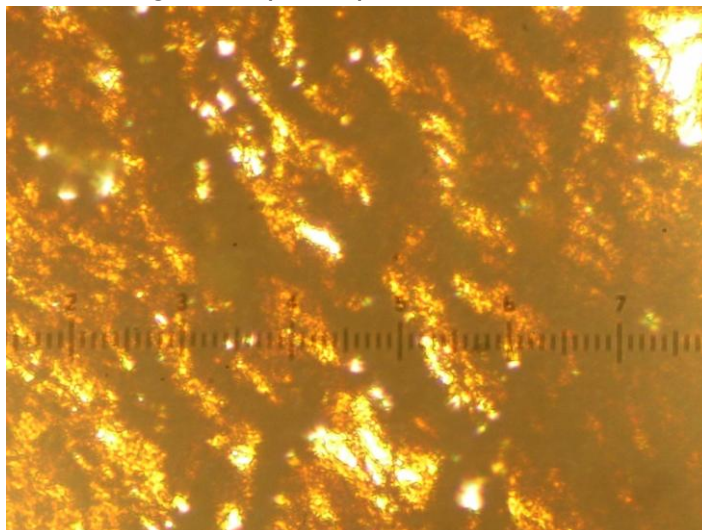


Fonte: Elaboração do próprio autor.

➤ **Contaminação com Vegetal (5%):**

- Carga com o peso de 5Kg e velocidade de 0.2m/s.

Figura 104 - Ferrograma após aquecimento com zoom de 1000X.

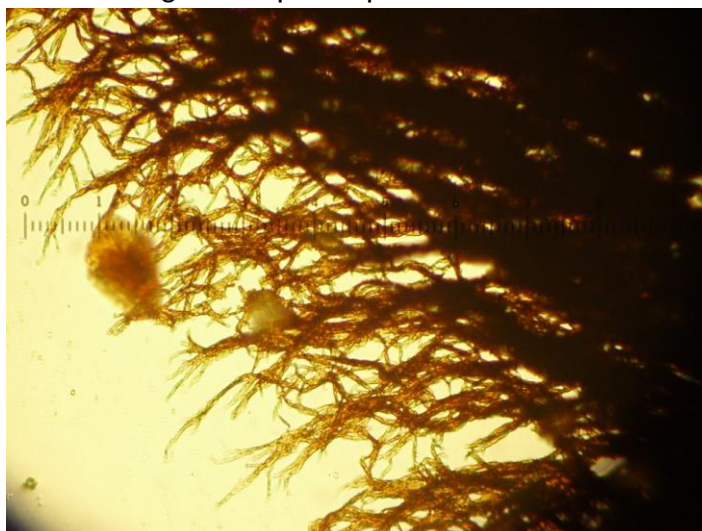


Fonte: Elaboração do próprio autor.

➤ **Contaminação com Vegetal (5%):**

- Carga com o peso de 5Kg e velocidade de 1m/s..

Figura 105 - Ferrograma após aquecimento com zoom de 500X.

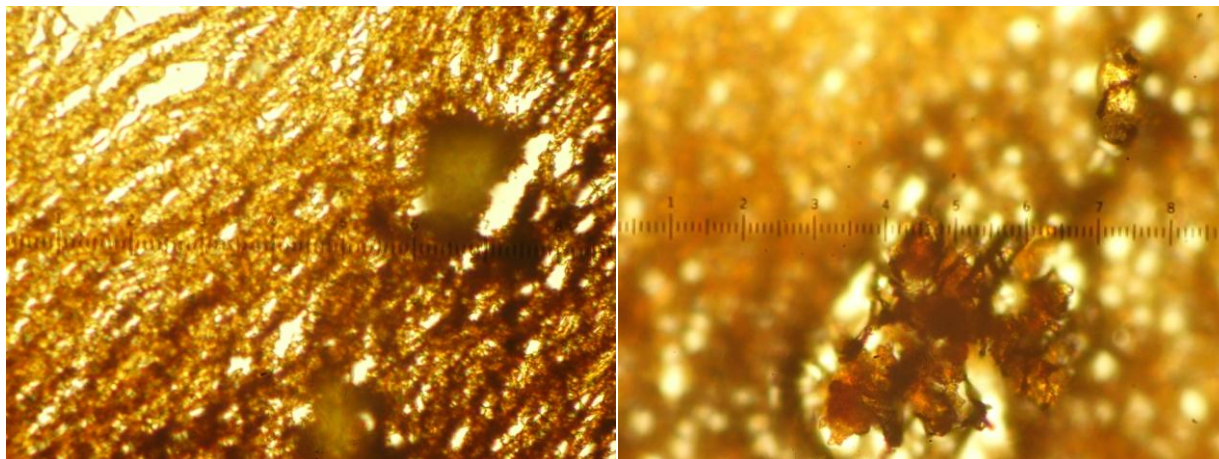


Fonte: Elaboração do próprio autor.

➤ **Contaminação com Animal (2%):**

- Carga com o peso de 500g e velocidade de 0.2m/s.

Figura 106 - Ferrograma após aquecimento com zoom de 500X à esquerda e zoom de 1000X à direita.

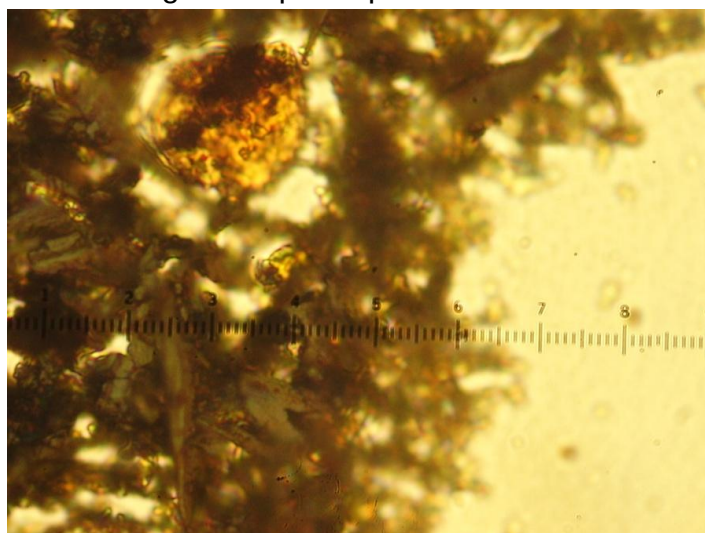


Fonte: Elaboração do próprio autor.

➤ **Contaminação com Animal (2%):**

- Carga com o peso de 5Kg e velocidade de 0.2m/s.

Figura 107 - Ferrograma após aquecimento com zoom de 500X.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

➤ **Contaminação com Animal (2%):**

- Carga com o peso de 5Kg e velocidade de 1m/s.

Figura 108 - Ferrograma após aquecimento com zoom de 500X.

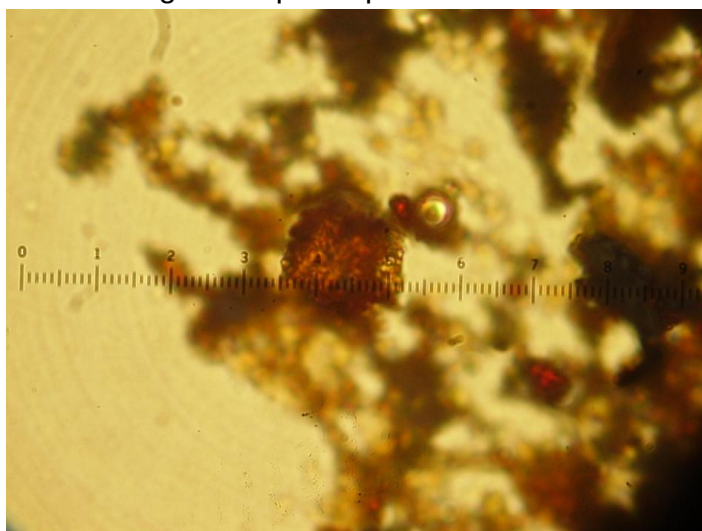


Fonte: Elaboração do próprio autor.

➤ **Contaminação com Animal (5%):**

- Carga com o peso de 5Kg e velocidade de 0.2m/s.

Figura 109 - Ferrograma após aquecimento com zoom de 500X.

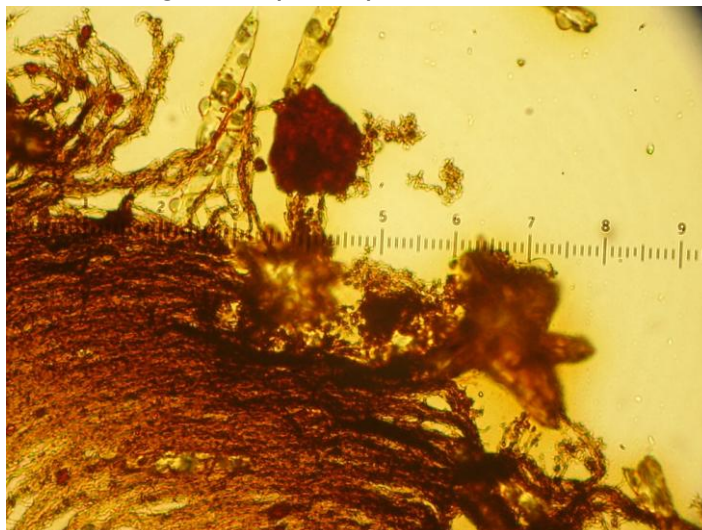


Fonte: Elaboração do próprio autor.

➤ **Contaminação com Animal + Vegetal (2%):**

- Carga com o peso de 5Kg e velocidade de 0.2m/s.

Figura 110 - Ferrograma após aquecimento com zoom de 500X.

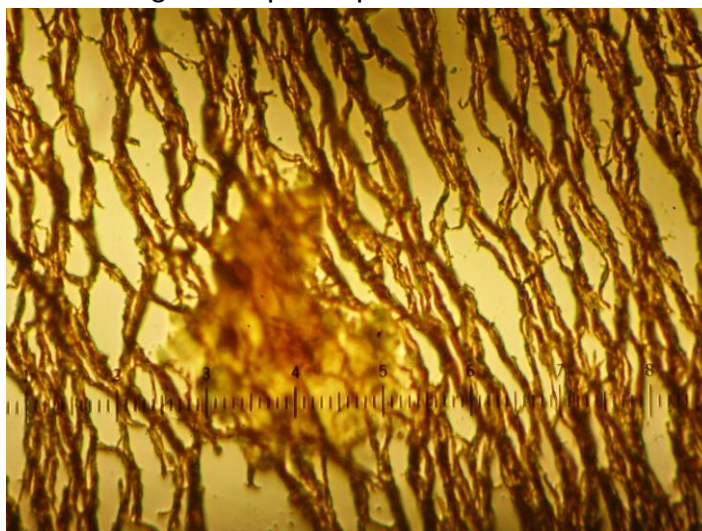


Fonte: Elaboração do próprio autor.

➤ **Contaminação com Animal + Vegetal (5%):**

- Carga com o peso de 5Kg e velocidade de 1m/s.

Figura 111 - Ferrograma após aquecimento com zoom de 1000X.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Através das fotos constata-se que há a predominância de óxidos escuros de ferro. Os ferrogramas demonstrados nas figuras 97, 100, 101, 104, 105, 107, 108 e 109 mostram a presença destes óxidos escuros.

Os ferrogramas nas figuras 98, 99, 101, 102, 104, 105, 106, 107, 109, 110 e 111 apresentam partículas amarronzadas, o que significa que são partículas de desgaste de média liga.

Por fim, observa-se que somente o ferrograma representado pela figura 103 apresenta uma partícula de desgaste azulada, ou seja, baixa liga.

4.7 Ponto de Fulgor

Foi realizado o ponto de fulgor para cada tipo de contaminação do óleo. Os valores podem ser observados na tabela 16.

Tabela 16 - Valores do ponto de fulgor após as contaminações.

B5		Biodiesel Vegetal (Girassol)		Biodiesel Animal (Sebo)		Biodiesel Animal + Vegetal	
2%	5%	2%	5%	2%	5%	2%	5%
220°C	210°C	224°C	218°C	234°C	227°C	222°C	216°C

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Como se pode perceber quanto maior a contaminação mais o ponto de fulgor decresce. Pode-se ver também que a contaminação com Biodiesel Animal foi a que menos alterou o ponto de fulgor.

4.8 PQA

Através do monitor de partículas ferrosas, é possível relacionar a quantidade de partículas ferromagnéticas presentes nas amostras ensaiadas. Abaixo segue a tabela 17, em que foi medida a quantidade para cada amostra, foram feitas três medidas e depois fez-se a média entre elas.

Tabela 17 - Valores do PQA após todos os ensaios.

(continua)

	1ª Medida	2ª Medida	3ª Medida	Média
B5 2% 0,2m/s 500g	24	23	22	23
B5 2% 0,2m/s 5kg	54	54	55	54,3

Tabela 17 - Valores do PQA após todos os ensaios.

(continuação)

	1ª Medida	2ª Medida	3ª Medida	Média
B5 2% 1m/s 500g	50	65	60	58,3
B5 2% 1m/s 5kg	76	80	79	78,3
B5 5% 0,2m/s 500g	31	29	27	29
B5 5% 0,2m/s 5kg	37	37	37	37
B5 5% 1m/s 500g	24	35	27	28,7
B5 5% 1m/s 5kg	146	103	93	114
Vegetal 2% 0,2m/s 500g	20	20	23	21
Vegetal 2% 0,2m/s 5kg	70	67	67	68
Vegetal 2% 1m/s 500g	43	51	35	43
Vegetal 2% 1m/s 5kg	246	249	227	240,7
Vegetal 5% 0,2m/s 500g	19	19	16	18
Vegetal 5% 0,2m/s 5kg	119	118	114	117
Vegetal 5% 1m/s 500g	18	19	19	18,7
Vegetal 5% 1m/s 5kg	36	40	36	37,3
Animal 2% 0,2m/s 500g	18	19	18	18,3
Animal 2% 0,2m/s 5kg	63	62	63	62,7
Animal 2% 1m/s 500g	21	21	24	22
Animal 2% 1m/s 5kg	521	423	433	459
Animal 5% 0,2m/s 500g	21	19	18	19,3
Animal 5% 0,2m/s 5kg	27	30	29	28,7
Animal 5% 1m/s 500g	29	33	34	32
Animal 5% 1m/s 5kg	227	246	227	233,3
Animal + Vegetal 2% 0,2m/s 500g	16	15	17	16
Animal + Vegetal 2% 0,2m/s 5kg	60	62	59	60,3
Animal + Vegetal 2% 1m/s 500g	18	14	16	16
Animal + Vegetal 2% 1m/s 5kg	179	188	174	180,3
Animal + Vegetal 5% 0,2m/s 500g	18	20	18	18,7
Animal + Vegetal 5% 0,2m/s 5kg	24	21	21	22

Tabela 17 - Valores do PQA após todos os ensaios.
(conclusão)

	1ª Medida	2ª Medida	3ª Medida	Média
Animal + Vegetal 5% 1m/s 500g	24	21	21	22
Animal + Vegetal 5% 1m/s 5kg	144	149	142	145

Fonte: Elaboração do próprio autor.

O desgaste expresso pelo PQA cresceu com a carga.

4.9 Espectrômetro de raio-x

A tabela 18 indica os valores obtidos diretamente do aparelho de espectrometria referente às oito amostras. A tabela 19 mostra os valores calculados para cada amostra e cada elemento levando-se em conta a diluição de cada amostra em Nujol.

Tabela 18 - Valores do espectrômetro de raio-X.

Elementos	Amostra 4	Amostra 8	Amostra 12	Amostra 16	Amostra 20	Amostra 24	Amostra 28	Amostra 32
Mg [mg/kg]	724,2	1240,2	1125,2	1910,3	504,2	135,5	801,6	582,9
Al [mg/kg]	87,7	51,0	60,3	45,7	27,7	12,1	87,4	121,4
Cl [mg/kg]	55,7	68,1	70,8	81,7	0,3	0,2	50,8	36,0
Ti [mg/kg]	9,7	10,1	21,5	10,8	2,2	1,7	4,8	2,7
V [mg/kg]	4,1	3,6	3,8	4,5	1,4	1,4	2,5	1,6
Cr [mg/kg]	2,8	5,5	4,3	5,1	2,6	2,3	2,3	2,0
Mn [mg/kg]	0,9	1,4	1,6	1,2	1,5	1,0	1,0	0,9
Fe [mg/kg]	83,2	253,9	313,5	211,8	209,2	140,3	95,0	32,7
Co [mg/kg]	3,6	5,0	4,9	3,1	8,3	8,7	6,1	6,4
Ni [mg/kg]	6,1	5,0	3,3	2,1	9,5	10,0	8,5	10,1
Cu [mg/kg]	5,3	3,2	0,6	4,9	18,2	16,7	13,6	16,4
Mo [mg/kg]	4,3	6,0	3,3	2,9	5,4	5,0	1,4	2,2
Sn [mg/kg]	54,0	45,9	35,9	21,8	144,0	153,8	58,7	96,0
Pb [mg/kg]	0,3	0,2	0,2	0,6	0,6	0,3	0,3	0,3
Zn [Wt %]	0,0237	0,0268	0,0294	0,0414	0,0123	0,0104	0,0151	0,0121
Ca [Wt %]	0,0915	0,0859	0,0868	0,0980	0,0261	0,0225	0,0687	0,0460
P [Wt %]	0,0556	0,0670	0,0658	0,0817	0,0139	0,0125	0,0556	0,0401
S [Wt %]	0,6809	0,8026	0,7950	0,9461	0,1764	0,1581	0,6614	0,4808

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 19 - Valores calculados de acordo com a diluição de cada amostra.

Elementos	Amostra 4	Amostra 8	Amostra 12	Amostra 16	Amostra 20	Amostra 24	Amostra 28	Amostra 32
Mg [mg/kg]	6370,1	8490,1	8057,9	12381,6	3302,9	1021,8	6064,9	4627,2
Al [mg/kg]	771,4	349,1	431,8	296,2	181,5	91,2	661,3	963,7
Cl [mg/kg]	489,9	466,2	507,0	529,5	2,0	1,5	384,3	285,8
Ti [mg/kg]	85,3	69,1	154,0	70,0	14,4	12,8	36,3	21,4
V [mg/kg]	36,1	24,6	27,2	29,2	9,2	10,6	18,9	12,7
Cr [mg/kg]	24,6	37,7	30,8	33,1	17,0	17,3	17,4	15,9
Mn [mg/kg]	7,9	9,6	11,5	7,8	9,8	7,5	7,6	7,1
Fe [mg/kg]	731,8	1738,1	2245,1	1372,8	1370,4	1058,0	718,8	259,6
Co [mg/kg]	31,7	34,2	35,1	20,1	54,4	65,6	46,2	50,8
Ni [mg/kg]	53,7	34,2	23,6	13,6	62,2	75,4	64,3	80,2
Cu [mg/kg]	46,6	21,9	4,3	31,8	119,2	125,9	102,9	130,2
Mo [mg/kg]	37,8	41,1	23,6	18,8	35,4	37,7	10,6	17,5
Sn [mg/kg]	475,0	314,2	257,1	141,3	943,3	1159,8	444,1	762,1
Pb [mg/kg]	2,6	1,4	1,4	3,9	3,9	2,3	2,3	2,4
Zn [Wt %]	0,2085	0,1835	0,2105	0,2683	0,0806	0,0784	0,1142	0,0961
Ca [Wt %]	0,8048	0,5880	0,6216	0,6352	0,1710	0,1697	0,5198	0,3652
P [Wt %]	0,4891	0,4587	0,4712	0,5295	0,0911	0,0943	0,4207	0,3183
S [Wt %]	5,9892	5,4944	5,6932	6,1321	1,1556	1,1922	5,0041	3,8167

Fonte: Elaboração do próprio autor.

A tabela 20 apresenta os gráficos com os valores das tabelas.

Tabela 20 - Gráficos dos elementos das amostras.

(continua)

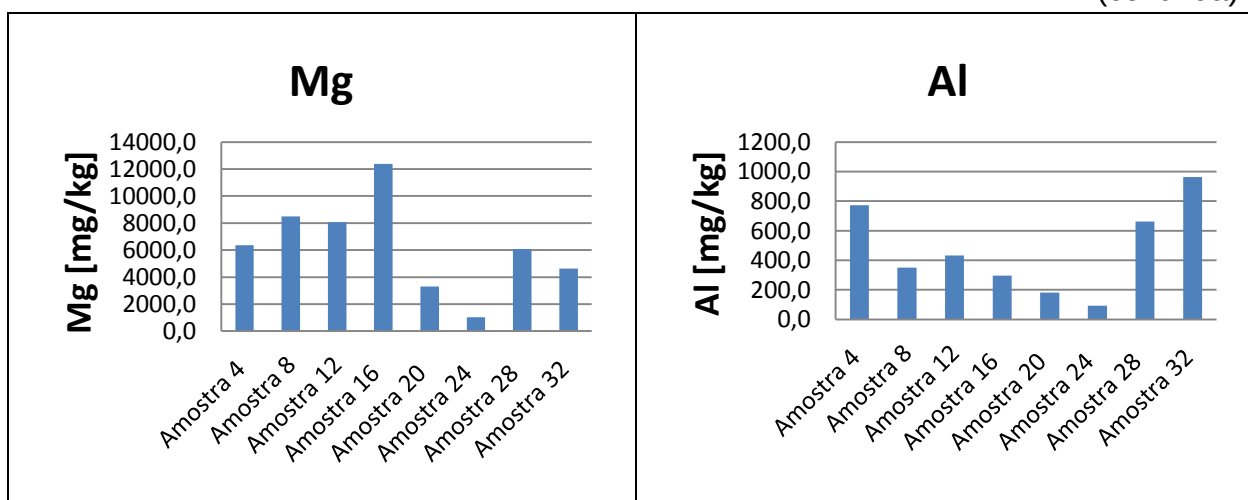


Tabela 20 - Gráficos dos elementos das amostras.

(continuação)

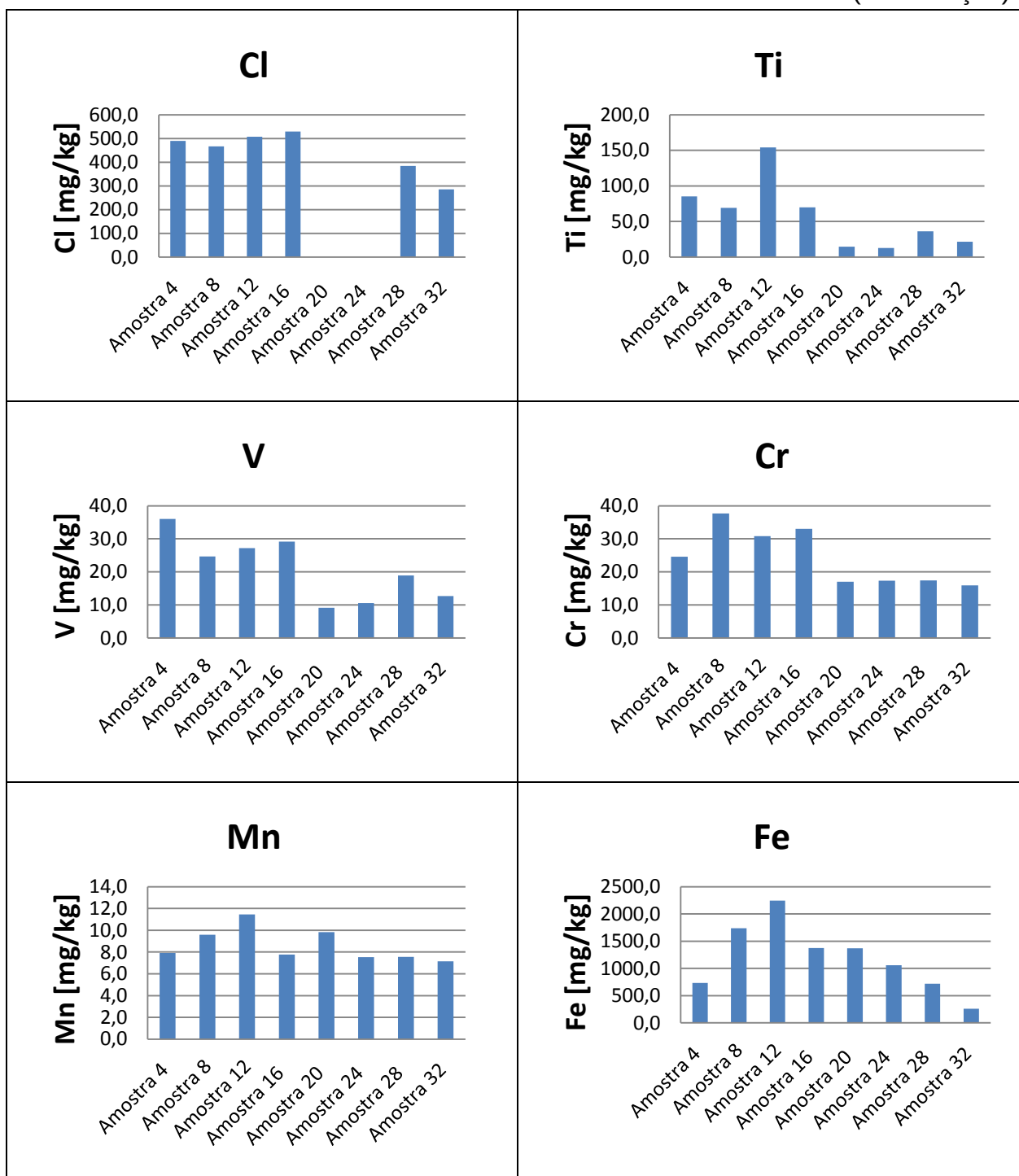


Tabela 20 - Gráficos dos elementos das amostras.

(continuação)

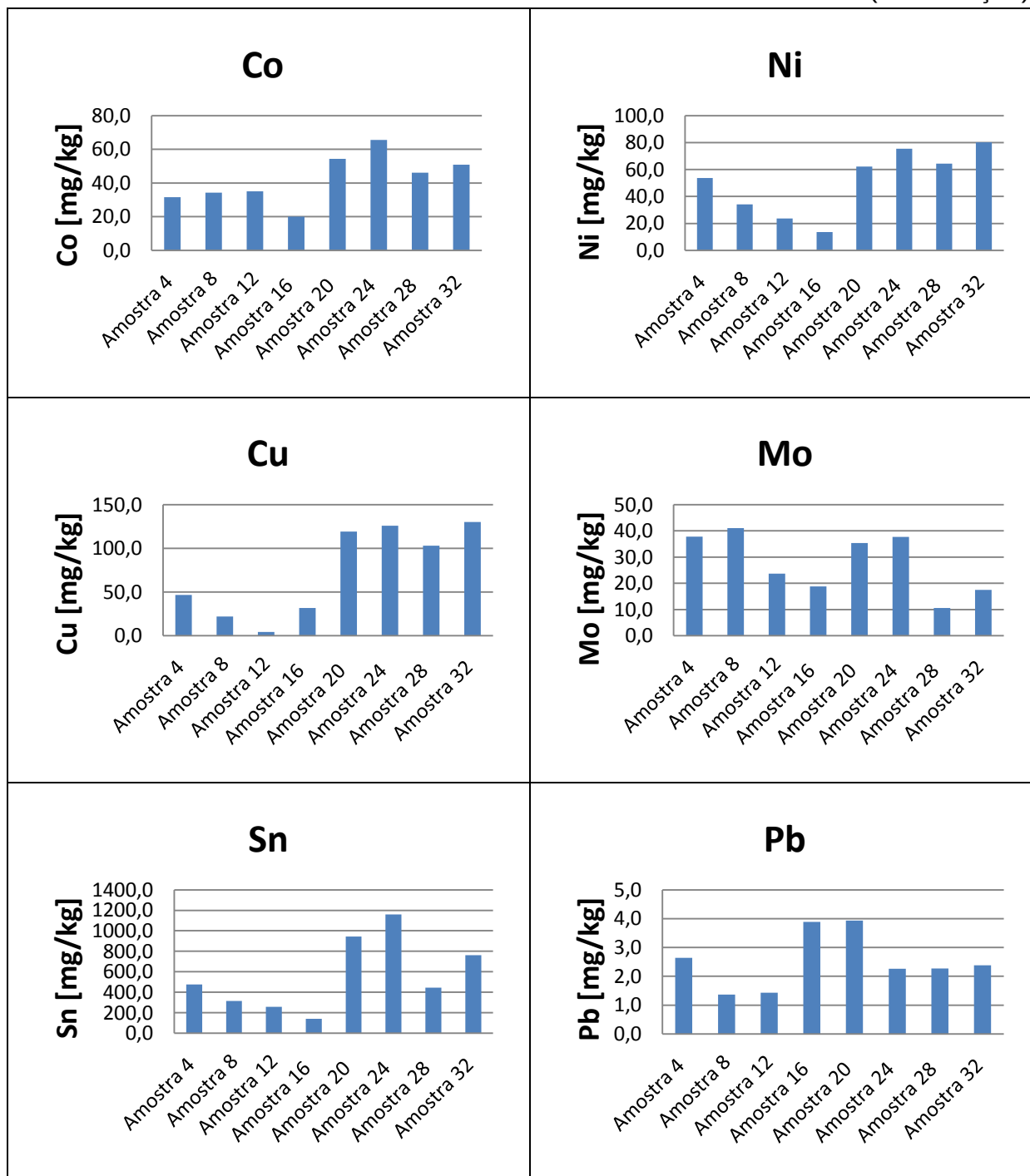
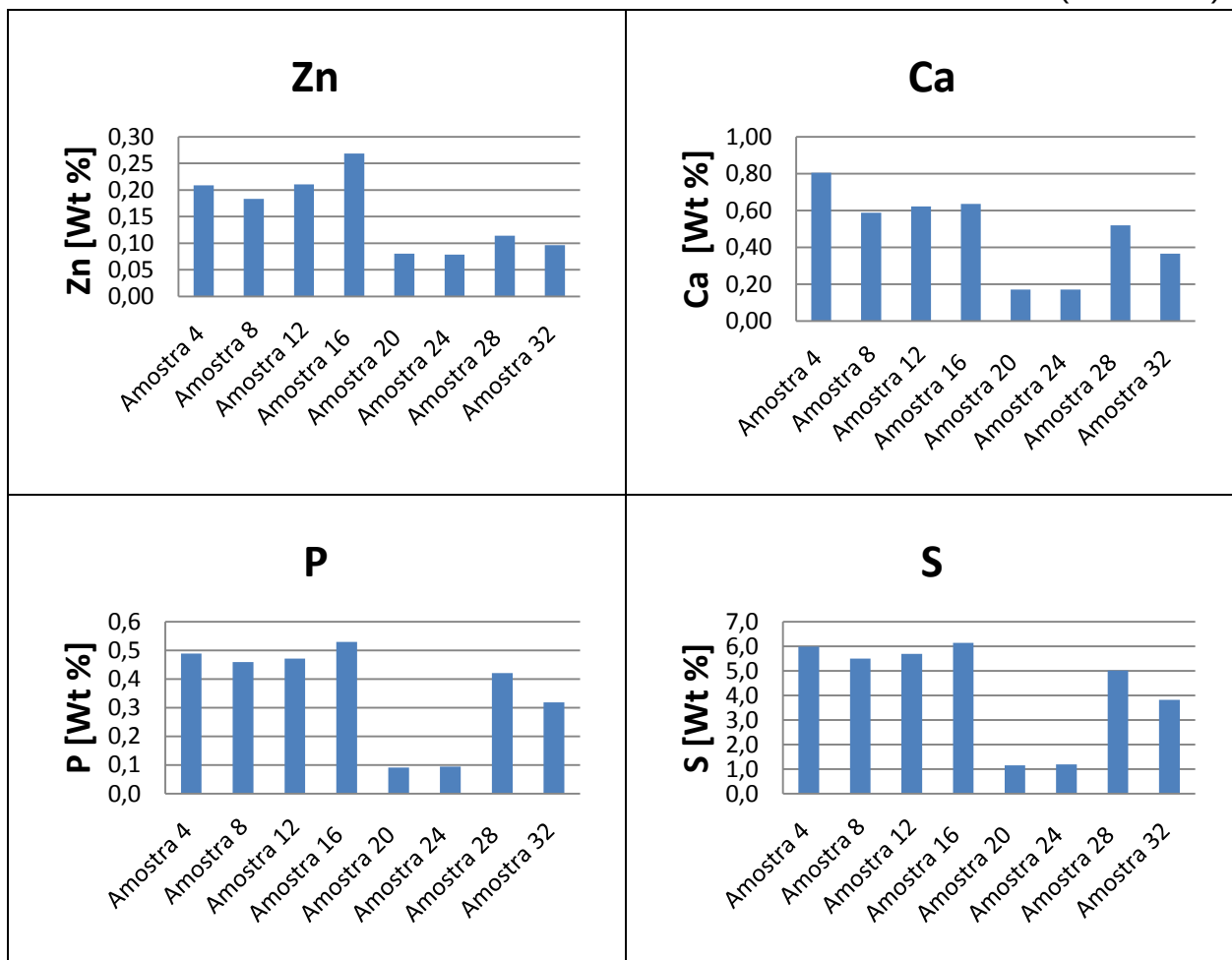


Tabela 20 - Gráficos dos elementos das amostras.

(conclusão)



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Através dos gráficos expostos acima se torna menos trabalhosa a análise dos dados. Deste modo, observa-se os seguintes resultados:

- A amostra 20 e a amostra 24 apresentaram pouquíssimo teor de Cl se comparadas às demais, o mesmo ocorre com a amostra 12 em relação ao Cu;
- A amostra 20 e a amostra 24 apresentaram menores taxas de Mg, Al, Ti, V, Zn, Ca, P e S;
- Os elementos mais abundantes nas amostras analisadas são: Fe, Sn, Zn, Ca, P e S; sendo que o elemento que apresenta as maiores taxas nas amostras é o Mg.

Através destes pontos observados pode-se constatar que os valores de Fe elevados devem-se ao desgaste entre o pino e o disco, já os outros elementos com

maiores taxas, que foram expostos em (c), devem-se a presença de aditivos no lubrificante utilizado nos testes.

4.10 Número de basicidade (reserva alcalina)

Os valores de reserva alcalina de KOH por grama de óleo lubrificante é expressa na tabela 21, assim como os valores de calibração do eletrodo para cada amostra.

Tabela 21 - Valor de TBN para cada amostra testada.

	Contaminação	Buffer Solution PH-4 [mV]	Buffer Solution PH-7 [mV]	Peso da amostra [g]	TBN [mg/g]
Óleo Lubrax SAE40 CF	Puro	155,0	-13,4	5,00	11.59
B5	2%	158,4	-16,1	5,00	12.09
	5%	162,1	-13,9	4,99	12.38
Vegetal	2%	159,0	-16,0	4,99	15.32
	5%	156,0	-17,9	5,00	14.80
Animal	2%	159,5	-16,0	4,99	15.83
	5%	156,0	-14,7	3,08	14.74
Vegetal+ Animal	2%	158,6	-15,1	3,04	15.55
	5%	155,0	-11,6	5,00	15.25

Fonte: Elaboração do próprio autor.

A tabela 22 demonstra como os valores de PH variam de acordo com a quantidade de titulante injetado na amostra, traçando o gráfico de PH x ml de titulante.

Tabela 22 - Gráfico do PH pela quantidade de Titulante adicionado na amostra.

(continua)

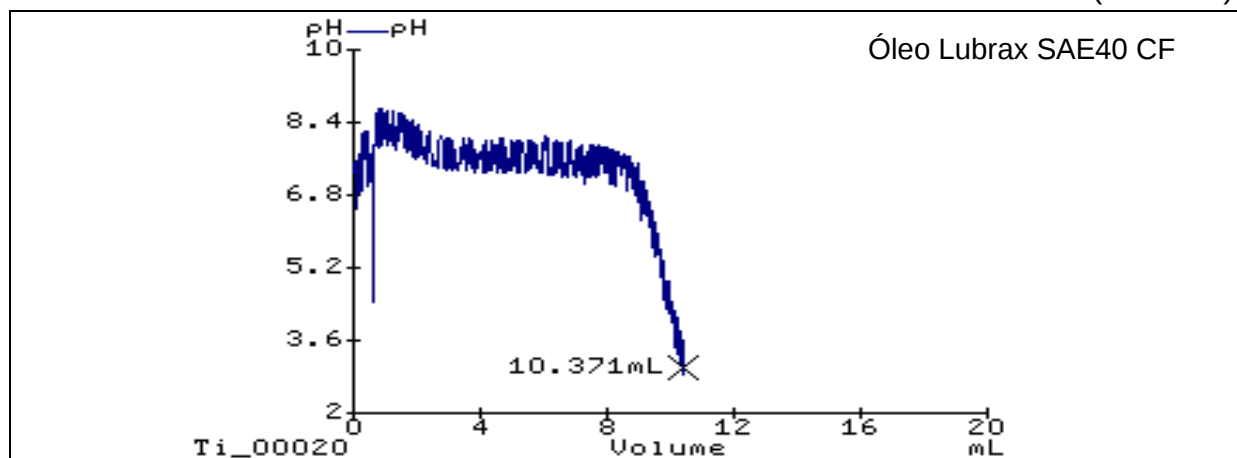
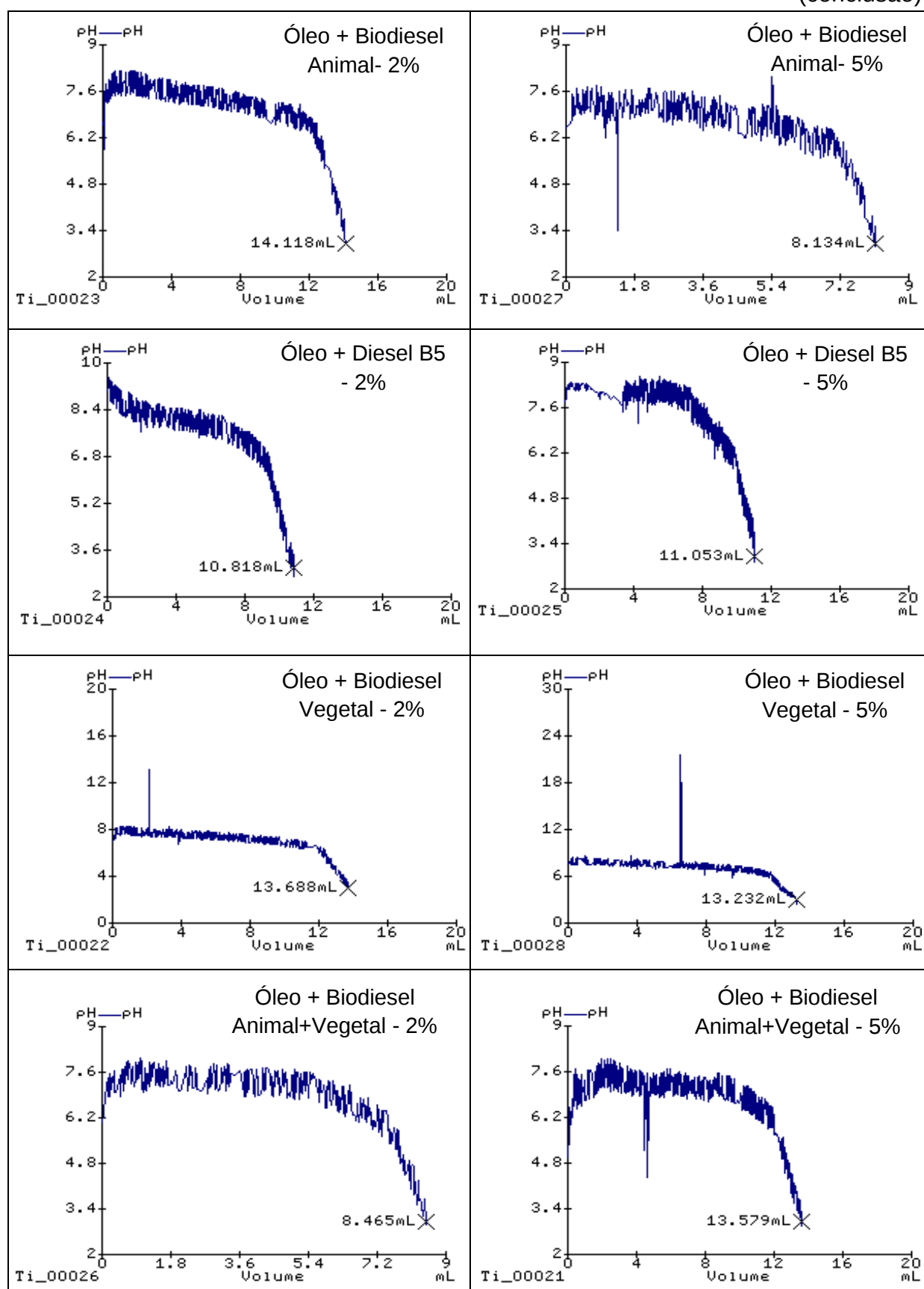


Tabela 22 - Gráfico do PH pela quantidade de Titulante adicionado na amostra.
(conclusão)



Fonte: Elaboração do próprio autor.

O óleo lubrificante utilizado nos testes tem uma reserva alcalina de KOH de 11,4 mg/g segundo o fabricante, mas através do teste em laboratório observa-se que esta reserva excede o expresso pelo fabricante para 11,6 mg/g. Como a variação é consideravelmente baixa, conclui-se que o óleo encontra-se dentro dos padrões e não chega a interferir no funcionamento do motor em um aspecto negativo.

Verifica-se que quando o óleo é contaminado pelos biodieseis vegetal e animal, há um aumento na reserva alcalina da amostra, apresentando valores até acima de 15 mg/g. O biodiesel que surte maior efeito no valor do “total base number” é a contaminação de biodiesel vegetal+ animal à 2%, que eleva a reserva alcalina para 15,55mg/g.

Através dos resultados obtidos observa-se também que quando o óleo é contaminado com diesel B5, o mesmo apresenta um aumento na reserva alcalina conforme há maior contaminação, enquanto todos os outros analisados mostram-se ao contrário, ou seja, conforme maior a contaminação, menor será a reserva alcalina.

Tendo em vista que os ácidos provenientes da combustão do motor diminuem esta reserva alcalina, o óleo pode ser utilizado até que ainda apresente uma reserva mínima, para que não haja corrosão e desgaste das peças.

5 CONCLUSÕES

No teste de índice de viscosidade verifica-se que a contaminação que age em benefício da lubrificação é a de 5% de biodiesel animal, já que se sabe que quanto maior o índice de viscosidade menor será a influência da temperatura. Por outro lado, tem-se que a contaminação por 5 % de biodiesel animal e vegetal juntas agirão de modo contrário, prejudicando o rendimento da lubrificação no motor, pois apresenta índice de viscosidade menor do que o que aconteceria na contaminação natural no sistema por diesel B5.

O teste de dispersão saiu como esperado, não apontando nenhuma falta de dispersão do lubrificante no sistema e nem melhora consubstancial do mesmo após cada contaminação em relação à contaminação natural por diesel B5.

A ferrografia analítica e o teste de aquecimento dos ferrogramas não apontaram nenhuma diferença perceptível em relação às partículas de desgaste formadas e os tipos de contaminação do óleo lubrificante. Entretanto, este quesito foi analisado posteriormente de forma quantitativa pela espectrometria de raios-X. Porém, as análises feitas por ferrografia analítica nos ferrogramas, antes e depois do teste de aquecimento, despertam ao fato de haver partículas de óxidos escuros em maioria, partículas de média liga e baixa liga nos materiais ensaiados.

Já no teste do ponto de fulgor, que influencia diretamente na combustão do contaminado, tem-se que quanto maior a contaminação, menor será o ponto de fulgor, assim como esperado.

No teste quantitativo de PQA obtém-se um índice, que pode ser comparado com índices anteriores ou amostras paralelas, para ver a evolução ou regressão das partículas ferromagnéticas de desgaste, sendo este um valor sem unidade de medida. Neste caso, constata-se que o tipo de contaminação mais prejudicial é a de 2% de biodiesel animal, sob condição de 1m/s e 5 Kg. Por outro lado, a contaminação de 5% de biodiesel puramente vegetal, sob 500g e 1m/s é a que houve menor desgaste por parte dos corpos, sendo, portanto a menos prejudicial neste aspecto.

No experimento de raios-X os resultados obtidos revelam o teor de cada elemento nas amostras analisadas, sendo que a amostra 12 de 2% de biodiesel

vegetal com 5Kg e 1m/s apresenta um desgaste consideravelmente maior do que as outras contaminações, apontado pela presença do ferro.

Através de outra análise obtém-se a alcalinidade, já que se sabe que quando ocorre a combustão no motor, os resíduos contaminam o óleo lubrificante, baixando assim a sua reserva alcalina. Tendo em vista este aspecto, é de suma importância que se considere a influência da contaminação de cada biodiesel no lubrificante. Para isso, foi feito o teste de alcalinidade do óleo lubrificante após a contaminação por cada tipo de biodiesel, o que mostrou que todas as contaminações não são prejudiciais em relação ao óleo lubrificante original, sendo que a amostra de 2% de contaminação por biodiesel vegetal se mostrou a que apresenta o melhor resultado. É importante salientar que o efeito benéfico é devido à contaminação dos biodieseis no lubrificante antes da combustão, sendo que os produtos da combustão são ácidos e não os biodieseis em si.

Portanto, através deste estudo comprova-se que a cada tipo de contaminação, vegetal ou animal, no biodiesel, pode-se melhorar algumas propriedades e piorar outras, assim como é o caso da contaminação do lubrificante por 2% de biodiesel vegetal, em que melhora a reserva alcalina do óleo, mas por outro lado, aumenta o desgaste das partes atritadas.

O ponto mais importante é salientar como é vital o uso da manutenção preditiva, mostrando que através da análise do óleo é possível que se tenha uma melhor ideia de quanto o equipamento ou máquina ainda será útil para produção.

Finalmente pode-se concluir que o ensaio em diferentes condições no aparelho de Pin-on-disk é uma maneira assertiva de simulação de duas superfícies em contato dinâmico.

6 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

- 1- Obter as medidas de dureza do pino e do disco, para que sejam comparados os desgastes com o de outros autores, que fizeram seus testes com condições similares de distância, carga e velocidade com materiais diferentes, mas de durezas similares.

- 2- Obter teoricamente o desgaste, através de equações apresentadas nesta dissertação, que possibilitam tal mensuração. Para isso, é necessário que se meça a profundidade do trilho de desgaste com o auxílio de um perfilômetro, obtendo-se a área de secção transversal, e posteriormente aplicando nas equações.

REFERÊNCIAS

ANDERSON, D. P. **Wear particle atlas**. Peabody: Telus, 1995.

ARATO JR., A. **Manutenção preditiva usando análise de vibrações**. Barueri: Manole, 2004. 190 p.

ARCHARD, J. F. Contact and rubbing of flat surfaces. **Journal of Applied Physics**, College Park, v. 24, p. 981, 1953.

ASL MANUTENÇÃO ELETROMECAÂNICA E SERVIÇOS. **Custos para tipos de manutenção**. São José dos Pinhais: ASL, 2012. Disponível em: <http://aslmanutencao.com.br/?page_id=142>. Acesso em: 19 set. 2012.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM Standard D-129**: standard test method for sulfur in petroleum products (general high pressure decomposition device method). West Conshohocken, ASTM International, 2011. DOI:10.1520/D0129-11.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM Standard D-1500**: standard test method for ASTM color of petroleum products (ASTM Color Scale). West Conshohocken, ASTM International, 2007. DOI: 10.1520/D1500-07.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM Standard D-482**: standard test method for ash from petroleum products. West Conshohocken, ASTM International, 2007. DOI: 10.1520/D0482-07.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM Standard D-524**: standard test method for ramsbottom carbon residue of petroleum products. West Conshohocken, ASTM International, 2010. DOI: 10.1520/D0524-10.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM Standard D-664**: standard test method for acid number of petroleum products by potentiometric titration. West Conshohocken, ASTM International, 2011. DOI: 10.1520/D0664-11A.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM Standard D-92**: standard test method for flash and fire points by Cleveland open cup tester. West Conshohocken, ASTM International, 2012. DOI: 10.1520/D0092-12.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM Standard D-974**: standard test method for acid and base number by color-indicator titration. West Conshohocken, ASTM International, 2012. DOI: 10.1520/D0974-12.

BARONI, T. A. D.; GOMES, G. F. **A ferrografia como técnica de manutenção preditiva**: estudo de casos. São Paulo: Huno Consultoria e Treinamento, 2012. 20 p. Disponível em: <<http://www.huno.com.br/tribolab/>>. Acesso em: 11 set. 2012.

BAYER, R. G. **Mechanical wear prediction and prevention**. New York: Marcel Dekker, 1994. 657 p.

BIELA, J. **Mecânica básica**. [S.l.]: Mecânica para Todos, 2012. Disponível em: <<http://mecanicomaniacos.blogspot.com.br/p/mecanica-basica.html>>. Acesso em: 6 nov. 2012.

BLAU, P. J. **Friction Science and technology**. New York: Marcel Dekker, 1996.

BURWELL, J. T.; STRANG, C. D. On the empirical law of adhesive wear. **Journal of Applied Physics**, College Park, v. 23, n. 1, p. 18, 1952.

CARRETEIRO, R. P.; MOURA, C. R. S. **Lubrificantes e lubrificação**. Rio de Janeiro: Makron Books, 1975.

CHENG, H. S. Elastohydrodynamic lubrication. In: BOOSER, E. R. **CRC handbook of lubrication**. Boca Raton: CRC Press, 1988. v. 2 Theory & Design.

CLAUDINO, J. B. **Motores Diesel comerciais no Brasil e no meio ambiente**. São Paulo: Núcleo, 2000.

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.

DABDOUB, M. J. **O programa paulista de produção de Biodiesel pré projeto de criação da rede paulista de Biodiesel**. [S.l., 2012]. Disponível em: <http://dabdoublabs.com.br/Sintese_projeto.htm>. Acesso em: 17 out. 2012.

DOWSON, D. **History of tribology**. London: Professional Engineer, 1997.

ENGEL, P. A. **Impact wear of materials**. New York: Elsevier, 1978.

GISPERT, M. P. et al. Friction and wear mechanisms in hip prosthesis: comparison of joint materials behaviour in several lubricants. **Wear**, New York, v. 260, p. 149-158, 2006. Disponível em: <www.elsevier.com/locate/wear>. Acesso em: 21 out. 2012.

GUERMAZI, N. et al. Tribological behaviour of pipe coating in dry sliding contact with steel. **Materials and Design**, London, v. 30, n. 8, p. 3094-3104, Sep. 2009. Disponível em: <www.elsevier.com/locate/matdes>. Acesso em: 20 out. 2012.

HAM, G. et al. Elasto-plastic finite element analysis of repeated two-dimensional rolling-sliding contacts. **Journal of Tribology**, New York, v. 110, n. 1, p. 44-49, 1988.

HAMILTON, G. M.; GOODMAN, L. E. The stress field created by a sliding circular contact. **Journal of Applied Mechanics**, New York, v. 33, n. 2, p. 371-376, 1966.
HANNA INSTRUMENTS. **HI902 automatic titration system**. Smithfield: Hanna Instruments, 2012. Disponível em: <www.hannainstruments.com>. Acesso em: 8 nov. 2012.

HOKKIRIGAWA, K.; KATO, K. An experimental and theoretical investigation of ploughing, cutting, and wedge formation during abrasive wear. **Tribology International**, Kidlington, v. 21, n. 1, p. 51-57, Feb. 1988.

HSIN-HAN, L.; CHAU-CHANG, C.; JYN-WEI, L. Tribological properties of Cr–Si–N nanocomposite film adherent silicon under various environments. **Thin Solid Films**, Lausanne, v. 518, n. 24, p.7509-7514, 2010. Disponível em: <www.elsevier.com/locate/tsf>. Acesso em: 20 out. 2012.

HUANG, H. D. et al. An investigation on tribological properties of graphite nanosheets as oil additive. **Wear**, Amsterdam, v. 26, n. 1, p. 140-144, 2006. Disponível em: <www.elsevier.com/locate/wear>. Acesso em: 21 out. 2012.

HUTCHINGS, I. M. **Tribology: friction and wear of engineering materials**. London: Edward Arnold, 1992. 273 p.

IGLESIAS, P. et al. Friction and wear of aluminium–steel contacts lubricated with ordered fluids-neutral and ionic liquid crystals as oil additives. **Wear**, Amsterdam, v. 256, p. 386-392, 2004. Disponível em: <www.elsevier.com/locate/wear>. Acesso em: 21 out. 2012.

IPIRANGA. **Lubrificação automotiva**. [S.l.: Ipiranga, 2013?]. 132 p.

KATO, K.; ADACHI, K. Wear and friction testing method. In: ASM INTERNATIONAL. **Handbook of metallurgy**. Tokyo: Maruzen, 2001.

KAYABA, T.; KATO, K. The adhesive transfer of the slip-tongue and the wedge. **Tribology Transactions**, Philadelphia, v. 24, n. 2, p. 164-174, 1981.

KAYABA, T.; KATO, K.; HOKKIRIGAWA, K. Teoretical analysis of the plastic yielding of a hard asperity sliding on a soft flat surface, **Wear**, Amsterdam, v. 87, p. 151-161, 1983.

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

KITTIWAKE DEVELOPMENTS. **Metallic wear particle depositor**. Littlehampton: Kitiwake Developments, 2012. Disponível em: <<http://www.kitiwake.com/ANALEXrpD.htm>>. Acesso em: 23 nov. 2012.

KNOTHE, G. et al. **Manual do biodiesel**. Curitiba: Edgard Blucher, 2006.
MALPICA, L. G. T. **Manutenção preditiva de motores de combustão interna, à gasolina, através da análise de lubrificantes**. 2007. 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2007.

KOUHANJANI, S. A.; BIDAHI, A. Z.; AKBARI-FAKHRABADI, A. The effect of sliding speed and amount of loading on friction and wear behavior of Cu-0.65%wt.Cr alloy. **Journal of Alloys and Compounds**, Amsterdam, v. 486, n. 1-2, p. 319-324, Nov. 2009. Disponível em: <www.elsevier.com/locate/jallcom>. Acesso em: 20 out. 2012.

MARU, M. M. **Estudo do desgaste e atrito de um par metálico sob deslizamento lubrificado**. 2003. 254 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

MATTEI, L. F. Programa nacional para a produção de biodiesel no Brasil (PNPB): trajetória, situação atual e desafios. In: CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ECONOMIA, ADMINISTRAÇÃO E SOCIOLOGIA RURAL - SOBER, 46., 2008, Rio Branco. **Anais...** Rio Branco: SOBER, 2008. 12 p. Disponível em: <www.sober.org.br/palestra/9/79.pdf>. Acesso em: 05 fev. 2009.

MB DO BRASIL - CONSULTORIA EM BIOCOMBUSTÍVEIS. **O biodiesel**. Ribeirão Preto: Mb do Brasil, 2010. Disponível em: <<http://mbdobrasil.com.br/modules.php?name=Content&pa=showpage&pid=8>>. Acesso em: 22 set. 2010.

MEZRIN, A. M. Determining local wear equation based on friction and wear testing using a Pin-on-Disk scheme. **Journal of Friction and Wear**, New York, v. 30, n. 4, p. 242-245, Aug. 2009.

MINDLIN, R. D. Compliance of elastic bodies in contact. **Journal of Applied Mechanics**, New York, v. 16, p. 259-268, 1949.

NEALE, M. J. (Ed.). **The tribology handbook**. 2. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1997.

OHAME, N. Analysis of the large plastic deformation involved in wear processes, using the finite method with an updated formulation. **Journal of Tribology**, New York, v. 109, n. 2, p. 330-337, 1987.

OHAME, N., TSUKIZOE, T. Analysis of a wear process using the finite element method. **Wear**, Amsterdam, v. 61, n. 2, p. 333-339, 1980.

OLIVEIRA, S. et al. Projeto para planejamento de melhoria da infraestrutura de Internet Datacenter (IDC) da empresa ACECO TI. São Paulo: Centro Universitário Estácio Uniradial, 2010. Disponível em: <[http://dc263.4shared.com/doc/hjC4uFxX/preview.html#8.Manutenção em Data Centers|outline](http://dc263.4shared.com/doc/hjC4uFxX/preview.html#8.Manutenção%20em%20Data%20Centers%20outline)>. Acesso em: 2 nov. 2012.

OXFORD INSTRUMENTS. **Products**. Abingdon: Oxford Instruments, 2013.
 PETROBRÁS. **Informações técnicas sobre o lubrificante utilizado disposto no site do fabricante**. Rio de Janeiro: PETROBRÁS, 2012. Disponível em: <<http://www.br.com.br/wps/wcm/connect/62f990004c4aa7e88463c60869efed74/ft-lub-automd400.pdf?MOD=AJPERES&CACHEID=62f990004c4aa7e88463c60869efed74>>. Acesso em: 4 mar. 2012.

PETROBRÁS. **Lubrificantes: fundamentos e aplicações**. Rio de Janeiro: Petrobras, 2009.

PORITSKY, H. Stresses and deflections of cylindrical bodies with application to contact of gears and locomotive wheels. **Journal of Applied Mechanics**, New York, v.17, p. 191-201, 1950.

PRESTES, R. A. L. **Tratores e máquinas agrícolas**. Maringá: Universidade Estadual de Maringá, 2009.

PRIEST, M.; TAYLOR, C. M. Automobile engine tribology: approaching the surface. **Wear**, New York, v. 241, n. 3-4, p. 193-203, 2000.

QUIMIS. **Viscosímetro Saybolt**. Diadema: Quimis, 2012. Disponível em: <<http://www.quimis.com.br/produtos.php?cat=5&sub=31&prod=158>>. Acesso em: 8 nov. 2012.

SHANTA, S.M. et al. Tribological effects os mineral oil lubricant contamination with biofuels: a pin-on-disk tribometry and wear study. **Advances in Tribology**, New York, v. 2011, 7 p., 2011. Article ID 820795. Disponível em: <<http://www.hindawi.com/journals/at/2011/820795/>>. Acesso em: 21 out. 2012.

SPACH OPTICS. **OLYMPUS BX 41**. Rochester: Spach Optics, 2012. Disponível em: <<http://www.spachoptics.com/PhotoGallery.asp?ProductCode=OLYMPUS-BX41-DIC>>. Acesso em: 2 out. 2012.

SRINIVASAN, S. I. **On the numerical prediction and experimental investigation of reciprocating sliding wear**. 2000. Thesis (Doctor of Philosophy) - The University of British Columbia, Vancouver, 2000.

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

TEXACO. **Fundamentos de lubrificação automotiva**. Rio de Janeiro: Texaco, 2005. 72 p.

TRICO. **Advanced machine condition analysis**. Pewaukee: Trico, 2008.

VAN WYLEN, G. J.; SONNTAG, R. E. (Eds.). **Fundamentals of classical thermodynamics**. New York: Wiley, 1985.

WATERHOUSE, R. B.; TAYLOR, D. E. Fretting drebris and the delamination thoery of wear. **Wear**, New York, v. 29, n. 3, p. 337-344, Sep. 1974.