

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

“ Uso da Técnica de Análise de Óleo Lubrificante em Motores Diesel Estacionários, Utilizando-se Misturas de Biodiesel e Diferentes Níveis de Contaminação do Lubrificante ”

**Rogério Katsuharu Kimura**

**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  
02/2010

#### FICHA CATALOGRÁFICA

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

K49u

Kimura, Rogério Katsuharu.

Uso da técnica de análise de óleo lubrificante em motores diesel estacionários, utilizando-se misturas de biodiesel e diferentes níveis de contaminação do lubrificante / Rogério Katsuharu Kimura. -- Ilha Solteira : [s.n.], 2010

128 f. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Mecânica dos Sólidos, 2010

Orientador: Aparecido Carlos Gonçalves

1. Biodiesel. 2. Análise de óleo. 3. Motor diesel. 4. Óleos lubrificantes.

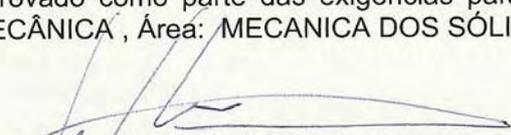
**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

**TÍTULO:** Uso da Técnica de Análise de Óleo em Motores Diesel Estacionários, Utilizando-se Misturas de Biodiesel e Diferentes Níveis de Contaminação do Lubrificante

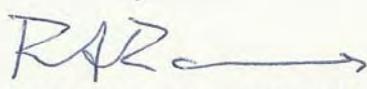
**AUTOR:** ROGÉRIO KATSUHARU KIMURA

**ORIENTADOR:** Prof. Dr. APARECIDO CARLOS GONCALVES

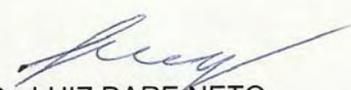
Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE em ENGENHARIA MECÂNICA, Área: MECANICA DOS SÓLIDOS, pela Comissão Examinadora:

  
Prof. Dr. APARECIDO CARLOS GONCALVES

Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

  
Prof. Dr. RICARDO ALAN VERDÚ RAMOS

Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

  
Prof. Dr. LUIZ DARE NETO

Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru

Data da realização: 22 de fevereiro de 2010.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus por me proporcionar saúde, sabedoria e forças para concretizar mais esta árdua etapa de minha vida, além disso, proporcionou que eu encontrasse ao longo desse percurso grandes amigos, amigos que tornaram essa jornada menos árdua e mais alegre.

Agradeço aos meus pais, que mesmo possuindo o mínimo de instrução acadêmica, usaram de grande sabedoria da vida para me incentivar a buscar meus objetivos sem medir esforços para me dar suporte em todas as etapas da vida.

Aos meus irmãos e irmãs, no qual, alguns distantes geograficamente, sempre fizeram o possível para me auxiliar nos momentos em que necessitei e especialmente a minha irmã Cleide e meu cunhado Edgard, que sempre foram meus pilares de apoio desde a época de graduação até os dias atuais, sendo exemplos de perseverança, bondade e fé.

Ao Prof. Dr. Aparecido Carlos Gonçalves por dispor de seu tempo para me orientar e por compartilhar seu grande conhecimento e sempre confiando em meu trabalho, tornando-se ao longo desse período um grande amigo e colega de profissão.

Ao Prof. Dr. Ricardo Alan Verdú Ramos pela grande amizade, pela dedicação ao me co-orientar informalmente em meu trabalho. Agradeço pela consideração e confiança depositada sobre a minha pessoa e meu trabalho, sendo um exemplo de pessoa e profissional.

Agradeço aos irmãos de coração Eng. Ricardo Alves da Costa de Mesquita e Eng. José Luis Rossi Nassif Jr por me ajudarem com as longas conversas, sugestões e grande amizade, tornando-se fieis amigos e companheiros de moradia durante o curso.

Ao Grupo BERTIN-BIODIESEL pela doação do Biodiesel utilizado durante o projeto.

Por fim, são muitos os nomes a serem lembrados por contribuírem direta e indiretamente em meu projeto, mas que merecem também meu profundo agradecimento e respeito.

**MUITO OBRIGADO**

**Rogério Katsuharu Kimura – Fev, 2010.**

## RESUMO

A manutenção atualmente é observada como um fator importante para uma empresa que busca destacar-se no mercado cada vez mais competitivo. Para que isso aconteça o uso de ferramentas estratégicas que proporcionam uma melhoria do parque industrial são fundamentais. A análise do óleo lubrificante é uma dessas ferramentas capazes de indicar a vida útil das partes internas de um equipamento. Acompanhando essa evolução, o uso de novas fontes de energia também ganha espaço, destacando-se as fontes de energia ecologicamente corretas, chamadas de fontes de energia “limpa” como é o caso do Biodiesel, combustível substituto do Diesel mineral, que pode ser produzido a partir de plantas oleaginosas ou gorduras animais. Em motores de combustão interna que trabalham com o ciclo Diesel (ignição por compressão) os resultados de testes com o uso do Biodiesel ainda estão sendo realizados, pois a regulamentação do uso obrigatório ainda é recente no país. Atualmente está regulamentada a mistura 4% de Biodiesel em volume misturado no Diesel derivado de petróleo. Para um bom funcionamento de um motor de ignição por compressão o uso de um lubrificante que segue as especificações do fabricante é essencial, pois o lubrificante possui muitas funções, sendo a principal delas manter as partes móveis do motor com o mínimo de atrito entre si. O uso de um lubrificante fora das especificações ou com contaminantes (água, combustível, etc) acarreta uma série de danos ao motor como desgaste, superaquecimento e baixo rendimento. Neste trabalho é utilizada a técnica de análise de óleo, onde se busca averiguar as possíveis influências que o uso do Biodiesel pode ter sobre as propriedades físico-químicas do lubrificante. Para tanto, a ferrografia analítica, a espectrografia por absorção atômica, ponto de fulgor, filtração por membrana de celulose e análise de viscosidade são exemplos dos ensaios realizados no trabalho. Os resultados obtidos mostram que a morfologia e a concentração de elementos encontrados via espectrografia por absorção atômica no lubrificante são considerados normais e que uma técnica isolada de análise não traduz a real situação de um sistema.

Palavras chave: Biodiesel, Análise de óleo, Motor Diesel, Lubrificantes.

## **ABSTRACT**

Maintenance is now seen as an important factor for a company that seeks to stand out in the market increasingly competitive. For that purpose the use of strategic tools that provides an improvement in the industrial park are key. The lubricant analysis is one of those tools that indicate the life of internal parts of equipment. Following those developments, the use of new sources of energy is also increasing; especially energy sources environmentally friendly, called sources of clean energy such as biodiesel-fuel substitute for mineral diesel, which can be produced from plant oil or animal fats. In internal combustion engines that work with the Diesel cycle (compression ignition) tests with the use of biodiesel is still being performed, since the regulation on the mandatory use is still young in the country. Nowadays it is currently regulated mixture of 4% biodiesel by volume mixed in diesel derived from petroleum. For good function of an ignition engine the use of a lubricant following the manufacturer's specifications is essential, since the lubricant has many functions, the main one being to keep the moving parts of the engine with minimal friction between it others. The use of a lubricant out of specification or with contaminants (water, fuel, etc.) has some kind of engine damage and wear, overheating and low income. This work uses the oil analysis technique, where it is tried the possible influence that the use of Biodiesel might have on the physical and chemical properties of the lubricant. Therefore, the analytical ferrography, the atomic absorption spectrometry, flash point, membrane filtration and viscosity analysis are examples of tests carried out at work. The results show that morphology and the concentration of particles found by atomic absorption spectrography in lubricant are considered normal and that a technique alone does not translate a real situation inside a mechanical system.

**Keywords:** Biodiesel, Oil analysis, Diesel engine, Lubricants.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Comparativo visual entre Diesel comum e Biodiesel puro B100 específico.....	26
Figura 2.2 – Marco regulatório do uso do Biodiesel .....	31
Figura 2.3 – Principais Matérias-Primas para produção de Biodiesel juntamente com porcentagem da produção média por região.....	34
Figura 2.4 – Esquema de transesterificação .....	35
Figura 2.5 – Estruturas básicas dos hidrocarbonetos.....	38
Figura 3.1 – Relação pressão e combustão.....	45
Figura 3.2 – Antecâmara tipo esférico.....	46
Figura 3.3 – Sistema de injeção com antecâmara.....	47
Figura 3.4 – Processo de injeção direta.....	47
Figura 3.5 – Processos do ciclo Diesel quatro tempos .....	48
Figura 3.6 – Processos do ciclo 2 tempos.....	50
Figura 4.1 – Esquema de funcionamento de um espectrógrafo.....	61
Figura 4.2 – Representação do processo da espectrografia por emissão atômica .....	62
Figura 4.3 – Representação do processo de espectrografia por absorção atômica.....	63
Figura 4.4 – Diagrama esquemático do equipamento de espectrografia por absorção atômica de feixe simples.....	65
Figura 4.5 – Esquema de ferrógrafo .....	67
Figura 4.6 – Equipamento e esquema de funcionamento do método de ferrografia direta.....	68
Figura 4.7 – Modelo de gráfico de tendências .....	68
Figura 4.8 – Gráfico do tipo "curva da asa" .....	69
Figura 4.9 – Ferrógrafo analítico FM III, juntamente com seu princípio de funcionamento ..	73
Figura 4.10 – Viscosímetro Cannon-Fenske. ....	75
Figura 4.11 – Determinação do índice de viscosidade.....	76
Figura 4.12 – Densímetro digital e Analógico. ....	77
Figura 4.13 – Método Cleveland para obter o ponto de fulgor. ....	77
Figura 4.14 – Equipamento para medir ponto de fluidez. ....	79
Figura 4.15 – Princípio de funcionamento equipamento Contameter TOSHIBA .....	80
Figura 4.16 – Monitor automático de partículas e diagrama de funcionamento .....	81
Figura 4.17 – Representação classificação ISO 4406 para contagem de partículas.....	82
Figura 5.1 – Características do motor usado nos testes.....	84
Figura 5.2 – Esquematisação dos ensaios realizados. ....	86

Figura 5.3 – RPD e ferrograma obtido. ....	87
Figura 5.4 – Especificações técnicas do RPD .....	88
Figura 5.5 – Microscópio utilizado nos ensaios, juntamente com detalhe da película de amostra. ....	89
Figura 5.6 – Reômetro e viscosímetro cinemático usado.....	89
Figura 5.7 – Equipamento PQA, com amostra de lubrificante e padrão de calibração.....	90
Figura 5.8 – Aparato para a filtragem por membrana de celulose. ....	93
Figura 6.1 – Imagens dos ferrogramas do período de “amaciamento” do motor M1( Diesel B3) obtidas via microscópio com aumento de 500x e 1000x.....	95
Figura 6.2 – Imagens dos ferrogramas do período de “amaciamento” do motor M2 (Diesel B3) obtidas via microscópio com aumento de 500x 1000x. ....	95
Figura 6.3 – Imagens dos ferrogramas do período de “amaciamento” do motor M3 (Diesel B3) obtidas via microscópio com aumento de 500x e 1000x.....	95
Figura 6.4 – Imagens dos ferrogramas das amostras sem contaminantes líquidos do motor M1 (B100 Animal) obtidas via microscópio com aumento de 500x e 1000x.....	96
Figura 6.5 – Imagens dos ferrogramas das amostras sem contaminantes líquidos do motor M2 (Diesel B3) obtidas via microscópio com aumento de 500x e 1000x.....	96
Figura 6.6 – Imagens dos ferrogramas das amostras sem contaminantes líquidos do motor M3 (B100 Vegetal) obtidas em microscópio com aumento de 500x e 1000x. ....	96
Figura 6.7 – Imagens dos ferrogramas das amostras com 1% de contaminantes líquidos do motor M1 (B100 Animal) obtidas via microscópio com aumento de 500x e 1000x. ....	97
Figura 6.8 – Imagens dos ferrogramas das amostras com 1% de contaminantes líquidos do motor M2 (Diesel B3) obtidas via microscópio com aumento de 500x e 1000x.....	97
Figura 6.9 – Imagens dos ferrogramas das amostras com 1% de contaminantes líquidos do motor M3 (B100 Vegetal) obtidas via microscópio com aumento de 500x e 1000x.....	97
Figura 6.10 – Imagens dos ferrogramas das amostras com 2% de contaminantes líquidos do motor M1(B100 Animal) obtidas via microscópio com aumento de 500x e 1000x. ....	98
Figura 6.11 – Imagens dos ferrogramas das amostras com 2% de contaminantes líquidos do motor M2 (Diesel B3) obtidas via microscópio com aumento de 500x e 1000x. ....	98
Figura 6.12 – Imagens dos ferrogramas das amostras com 2% de contaminantes líquidos do motor M3 (B100 Vegetal) obtidas via microscópio com aumento de 500x e 1000x.....	98
Figura 6.13 – Imagens dos ferrogramas das amostras com 3% de contaminantes líquidos do motor M1 (B100 Animal) obtidas via microscópio com aumento de 500x e 1000x. ....	99

Figura 6.14 – Imagens dos ferrogramas das amostras com 3% de contaminantes líquidos do motor M2 (Diesel B3) obtidas via microscópio com aumento de 500x e 1000x.....	99
Figura 6.15 – Imagens dos ferrogramas das amostras com 3% de contaminantes líquidos do motor M3 (B100 Vegetal) obtidas via microscópio com aumento de 500x e 1000x.....	99
Figura 6.16 – Níveis de cobre obtidos via Absorção Atômica.....	101
Figura 6.17 – Níveis de Silício obtidas via Absorção Atômica.....	101
Figura 6.18 – Níveis de Alumínio obtidas via Absorção Atômica.....	102
Figura 6.19 – Níveis de Ferro obtidas via Absorção Atômica. ....	102
Figura 6.20 – Níveis de Chumbo obtidas via Absorção Atômica. ....	103
Figura 6.21 - Níveis de Cromo obtidas via Absorção Atômica. ....	103
Figura 6.22 – Níveis de Níquel obtidas via Absorção Atômica. ....	104
Figura 6.23 – Representação das viscosidades das amostras em 40 °C e 100 °C. ....	106
Figura 6.24 – Gráfico comparativo do índice PQ para os motores utilizados.....	110
Figura 6.25 – Comparativo visual das membranas de filtragem. ....	111
Figura 6.26 – Partículas das membranas de celulose obtidas em microscópio do motor M1, do período de amaciamento e com aumento de 500x e 1000x.....	112
Figura 6.27 – Partículas das membranas de celulose obtidas em microscópio do motor M2, do período de amaciamento e com aumento de 500x e 1000x.....	112
Figura 6.28 – Partículas das membranas de celulose obtidas em microscópio do motor M3, do período de amaciamento e com aumento de 500x e 1000x.....	112
Figura 6.29 - Partículas das membranas de celulose obtidas em microscópio do motor M1, livre de contaminante líquido e com aumento de 500x e 1000x. ....	113
Figura 6.30 – Partículas das membranas de celulose obtidas em microscópio do motor M2, livre de contaminante líquido e com aumento de 500x e 1000x. ....	113
Figura 6.31 – Partículas das membranas de celulose obtidas em microscópio do motor M3, livre de contaminante líquido e com aumento de 500x e 1000x. ....	113
Figura 6.32 – Partículas das membranas de celulose obtidas em microscópio do motor M1, com 1% de contaminante líquido e com aumento de 500x e 1000x. ....	114
Figura 6.33 – Partículas das membranas de celulose obtidas em microscópio do motor M2, com 1% de contaminante líquido e com aumento de 500x e 1000x. ....	114
Figura 6.34 – Partículas das membranas de celulose obtidas em microscópio do motor M3, com 1% de contaminante líquido e com aumento de 500x e 1000x. ....	114
Figura 6.35 – Partículas das membranas de celulose obtidas em microscópio do motor M1, com 2% de contaminante líquido e com aumento de 500x e 1000x. ....	115

Figura 6.36 – Partículas das membranas de celulose obtidas em microscópio do motor M2, com 2% de contaminante líquido e com aumento de 500x e 1000x. ....	115
Figura 6.37 – Partículas das membranas de celulose obtidas em microscópio do motor M3, com 2% de contaminante líquido e com aumento de 500x e 1000x. ....	115
Figura 6.38 – Partículas das membranas de celulose obtidas em microscópio do motor M1, com 3% de contaminante líquido e com aumento de 500x e 1000x. ....	116
Figura 6.39 – Partículas das membranas de celulose obtidas em microscópio do motor M2, com 3% de contaminante líquido e com aumento de 500x e 1000x. ....	116
Figura 6.40 – Partículas das membranas de celulose obtidas em microscópio do motor M3, com 3% de contaminante líquido e com aumento de 500x e 1000x. ....	116

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Matérias-primas vegetais para produção de Biodiesel no Brasil .....	33
Tabela 2.2 – Quadro comparativo das propriedades do Diesel com o Biodiesel .....	39
Tabela 2.3 – Influência das propriedades do combustível no motor. ....	40
Tabela 4.1 – Tabela de classificação API para Motores de Ciclo Diesel .....	56
Tabela 4.2 - Tabela de classificação SAE J300 .....	59
Tabela 4.3 – Comparativo absorção atômica e emissão atômica .....	64
Tabela 4.4 – Elementos detectados na espectrografia por absorção atômica, juntamente com suas origens.....	66
Tabela 4.5 – Sistema de classificação ISO para partículas .....	83
Tabela 5.1 – Propriedades físico-químicas do lubrificante usado .....	86
Tabela 5.2 – Especificações do PQA . ....	91
Tabela 6.1 – Valores da Absorção Atômica dos elementos. ....	100
Tabela 6.2 – Viscosidades dos ensaios realizados.....	105
Tabela 6.3 – Teor de água encontrada nas amostras de óleo lubrificante dos motores.....	107
Tabela 6.4 – Ponto de fulgor obtido das amostras com 3% de contaminação. ....	108
Tabela 6.5 – Índice PQ das amostras dos motores. ....	109
Tabela 6.6 – Contagem de partículas ISO das amostras coletadas nos motores. ....	118
Tabela 6.7 – Número de Basicidade das amostras de óleo lubrificante. ....	119
Tabela 6.8 – Consumo médio de combustível.....	120

## LISTA DE SIGLAS

AA	Absorção Atômica
ACEA	<i>Association des Constructeurs Européens de l'Automobile</i>
ACFTD	<i>Air Cleaner Test Dust</i>
AES	Absorção por Emissão Atômica
ANP	Agência Nacional de Petróleo, Gás e Biocombustíveis
API	<i>American Petroleum Institute</i>
Atm	Atmosferas (pressão)
B(XX)	Indica o grau de mistura do Biodiesel com o Diesel
BIA	<i>Boating Industry Association</i>
CCD	<i>Charge Coupled Device</i>
CG	Cromatografia gasosa
CNPE	Conselho Nacional de Política Energética
cSt	Centistokes
EGR	<i>Exhaust gas recirculation</i>
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EPA	Environmental Protection Agency
HP	<i>Horse Power</i>
HSI	<i>Hue Saturation Intensit</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICE	Ignição por Centelha
ICO	Ignição por Compressão
ICPE	Plasma Induzido por Emissão
ISO	<i>International Standard Organization</i>
JASO	<i>Japanese Automobile Standards Organization</i>
KOH	Hidróxido de potássio
mm	Milímetros
MAPA	Ministério de Agricultura, Pecuária e Abastecimento
MDA	Ministério de Desenvolvimento Agrário
MIL-L 2104	Especificação de lubrificante especial para altas temperaturas
MME	Ministério de Minas e Energia
MTD	<i>Médium Test Dust</i>

NMMA	<i>National Marine Manufacturers Association</i>
Nox	Oxido de Nitrogênio
PAO	<i>Poli Alfa Olefin</i>
PMS	Ponto Morto Superior
PPM	Partes por milhão
PQA	<i>Particle Quantifier Analysis</i>
RPD	<i>Rotary Particles Analysis</i>
RPM	Rotações por Minuto
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
SOAP	<i>Spectrometric Oil Analysis Program</i>
TAN	<i>Total Acid Number</i>
TBN	<i>Total Base Number</i>
TC-W	<i>Two Cycle Water</i>
VI	Índice de viscosidade
XRF	Raio X por Fluorescência
ZrO <sub>2</sub>	Zircônia

## SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO.....	16
1.1 – JUSTIFICATIVAS.....	18
1.2 – ALGUNS TRABALHOS RELACIONADOS.....	19
1.3 – OBJETIVOS.....	24
2 – BIODIESEL.....	25
2.1 – DEFINIÇÃO.....	25
2.2 – BREVE HISTÓRICO.....	26
2.2.1 – O Biodiesel no Mundo.....	26
2.2.2 – O Biodiesel no Brasil.....	28
2.3 – VANTAGENS DO BIODIESEL.....	29
2.4 – DESVANTAGENS DO BIODIESEL.....	30
2.5 – MARCO REGULATÓRIO NO BRASIL E ÓRGÃOS REGULADORES.....	30
2.6 – MATÉRIAS PRIMAS.....	32
2.7 – TECNOLOGIA DE PRODUÇÃO.....	34
2.7.1 – Preparação da Matéria-Prima.....	35
2.7.2 – Transesterificação.....	35
2.7.3 – Separação de fases.....	36
2.7.4 – Recuperação do Álcool da Glicerina e dos Ésteres.....	36
2.7.5 – Desidratação do Álcool.....	37
2.7.6 – Purificação dos Ésteres.....	37
2.7.7 – Destilação/Purificação do Glicerol.....	37
2.8 - CARACTERÍSTICAS DO DIESEL.....	37
2.9 – COMPARATIVO DIESEL X BIODIESEL.....	39
2.10 - PROPRIEDADES X DESEMPENHO DO MOTOR DIESEL.....	40
3 – MOTORES A COMBUSTÃO INTERNA.....	41
3.1 - DEFINIÇÃO.....	41
3.2 - CLASSIFICAÇÃO.....	41
3.3 – PRINCÍPIO DE COMBUSTÃO EM UM MOTOR DIESEL.....	42
3.3.1 – Processo por injeção.....	42
3.3.2 – Ignição.....	43
3.3.3 – Retardo da injeção.....	43

3.4 – TIPOS DE INJEÇÃO DE COMBUSTÍVEL .....	45
3.4.1 – Injeção indireta .....	46
3.4.2 – Injeção direta .....	47
3.5 – MOTORES QUATRO TEMPOS.....	48
3.6 – MOTORES DOIS TEMPOS .....	49
4 – LUBRIFICANTES E TÉCNICAS DE ANÁLISE DE ÓLEO LUBRIFICANTE.....	52
4.1 – LUBRIFICANTES .....	52
4.1.1 – Propriedades fundamentais do óleo lubrificante .....	53
4.1.2 – Classificações .....	54
4.1.2.1 – Classificação API .....	55
4.1.2.2 – Classificação SAE .....	58
4.1.3 – Aditivos .....	60
4.2 – TÉCNICAS DE ANÁLISE DE LUBRIFICANTES USADOS.....	61
4.2.1 – Espectrometria .....	61
4.2.1.1 – Emissão Atômica.....	62
4.2.1.2 – Absorção Atômica .....	63
4.2.1.3 – Emissão Atômica versus Absorção Atômica .....	63
4.2.1.4 – Instrumentação necessária para absorção atômica .....	64
4.2.2 – Ferrografia .....	66
4.2.2.1 – Ferrografia Direta .....	67
4.2.2.2 – Ferrografia Analítica .....	69
4.2.3 – Viscosidade.....	74
4.2.4 – Índice de Viscosidade.....	75
4.2.5 – Densidade .....	76
4.2.6 – Ponto de fulgor .....	77
4.2.7 – Ponto de Fluidez .....	78
4.2.8 – <i>Total Acid Number/Total Base Number</i> .....	79
4.2.9 – Concentração de Partículas.....	80
4.2.10 – Filtragem por Membrana e Contagem de partículas .....	81
5 – MATERIAIS E MÉTODOS.....	84
5.1 – INTRODUÇÃO.....	84
5.2 – DEPOSITADOR ROTATIVO DE PARTÍCULAS (RPD) .....	87
5.3 – MICROSCÓPIO ÓPTICO .....	88
5.4 – VISCOSÍMETRO.....	89

5.5 – MONITOR DE PARTÍCULAS FERROSAS (PQA).....	89
5.6 – CONTADORES DE PARTÍCULAS .....	91
5.7 – PONTO DE FULGOR .....	91
5.8 – FILTRAGEM POR MEMBRANA DE CELULOSE .....	92
5.9 – ESPECTROGRAFIA POR ABSORÇÃO ATÔMICA .....	93
6 – RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	94
6.1 – FERROGRAFIA ANALÍTICA.....	94
6.2 – ESPECTROGRAFIA POR ABSORÇÃO ATÔMICA .....	100
6.3 – VISCOSIDADE CINEMÁTICA .....	104
6.4 – TEOR DE ÁGUA.....	106
6.5 – PONTO DE FULGOR .....	108
6.6 – MONITOR DE PARTÍCULAS FERROSAS (PQA).....	108
6.7 – FILTRAGEM POR MEMBRANA DE CELULOSE .....	110
6.8 – CONTAGEM DE PARTÍCULAS ISO .....	117
6.9 – NÚMERO DE BASICIDADE (TBN).....	119
6.10 – CONSUMO MÉDIO DE COMBUSTÍVEL .....	120
7 – CONCLUSÕES .....	121
8 – CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS .....	123
REFERÊNCIAS .....	124

## 1 – INTRODUÇÃO

Segundo Ferreira (1975), manutenção significa: “Ato ou efeito de manter-se as medidas necessárias para a conservação ou a permanência de alguma coisa ou de uma situação. Os cuidados técnicos indispensáveis ao funcionamento regular e permanente de motores e máquinas”. Assim, o termo manutenção subdivide-se basicamente em duas formas: manutenção corretiva e manutenção preventiva.

A manutenção corretiva atua corrigindo uma falha ou uma quebra de um equipamento, sua maior função é reparar um dano, tendo como principal desvantagem a quebra inesperada de uma máquina ou componente da mesma em regime de trabalho normal. É uma técnica que exige um estoque alto de peças sobressalentes, tornando-a muitas vezes inviável de ser aplicada.

Segundo Monchy (1989), “manutenção preventiva é uma intervenção de manutenção prevista, preparada e programada antes da data provável do aparecimento de uma falha”.

A manutenção preventiva toma uma série de ações, atividades ou diretrizes que podem parar ou diminuir, ou não, a necessidade da manutenção corretiva. Ela pode atuar em função do tempo de funcionamento da máquina (Manutenção Sistemática) ou atuar com as informações adquiridas através da inspeção das condições físicas e observando o comportamento da máquina verificando possíveis falhas (Manutenção Preditiva).

As vantagens da manutenção preventiva são:

- ✓ Parada das máquinas em horários determinados, assegurando assim, a continuidade da produção.
- ✓ Facilidade de cumprir os programas de produção.

Em contrapartida a empresa deve dispor de mão de obra qualificada para executar as manutenções necessárias e ter um plano de manutenção muito bem estruturado a fim de buscar uma faixa em que estatisticamente as partes necessitem de uma real intervenção, evitando a troca precoce ou retardada de componentes.

De acordo com Viana (1991), “manutenção preditiva é o monitoramento ou acompanhamento periódico do desempenho e/ou deterioração de partes das máquinas. A finalidade é fazer-se a manutenção somente quando e se houver necessidade. Caso contrário, mexer na máquina o mínimo possível: o homem introduz o defeito”.

Mirshawka (1993) define manutenção preditiva como “a manutenção preventiva baseada no conhecimento do estado/condição de um item, através de medições periódicas ou contínuas de um ou mais parâmetros significativos. A intervenção de manutenção preditiva busca a detecção precoce dos sintomas que precedem uma avaria. São denominações equivalentes: manutenção baseada na condição ou manutenção baseada no estado ou manutenção condicional”.

Entre as técnicas de monitoramento utilizadas na manutenção preditiva destacam-se:

- ✓ Análise de vibrações de equipamentos rotativos e alternativos;
- ✓ Análise de corrente e fluxo magnético de motores elétricos;
- ✓ Análise de óleo lubrificante;
- ✓ Termografia de sistemas elétricos e mecânicos;
- ✓ Ultrassom para detecção de vazamentos e defeitos de válvulas e purgadores.

Dentre as vantagens da manutenção preditiva podem ser destacadas as seguintes:

- ✓ Determinação de um ponto ótimo para aplicar a manutenção preventiva, pois com a análise dos dados coletados é possível determinar a necessidade real de intervenção, identificando equipamentos com problemas crônicos a propor correções, resultando assim, em um aumento da disponibilidade de recursos e redução de custos em manutenção.
- ✓ Eliminação da troca prematura de componentes com vida útil remanescente ainda significativa.
- ✓ Aumento da vida útil das máquinas e componentes pela melhoria das condições de instalação e operação.

As desvantagens encontradas na manutenção preditiva estão nas inspeções periódicas, através de instrumentos específicos de monitoração, o que também requer pessoal qualificado para a realização do serviço.

Uma das importantes técnicas utilizadas é análise do óleo lubrificante nos motores a combustão interna de ciclo Diesel, que consiste em determinar os primeiros sintomas de desgaste de um componente. A identificação é feita por meio do estudo da quantidade de partículas, tamanho, forma e composição, análise de viscosidade, TBN (Número Total de Basicidade), TAN (Número Total de Acidez) e índice de partículas magnéticas, que fornecem informações sobre as condições dos componentes internos sem a necessidade de avaliação visual, o que resultaria na parada do equipamento.

## 1.1 – JUSTIFICATIVAS

Com o crescimento das economias e com o mercado cada vez mais competitivo, o consumo de energia aumentou significativamente nas últimas décadas, sendo a maioria das fontes energéticas oriundas de reservas não renováveis, acarretando, ao longo dos tempos, em danos ambientais muitas vezes irreversíveis.

Buscando a diminuição desses impactos ao ambiente, foram buscadas novas fontes de energias renováveis, menos poluentes, para substituir os derivados do petróleo. Assim, em substituição a gasolina desenvolveu-se o álcool, combustível derivado da cana-de-açúcar, e em substituição ao Diesel desenvolveu-se o Biodiesel, combustível extraído de plantas oleaginosas ou gordura animal.

Grandes quantidades de Biodiesel, das mais variadas origens estão sendo utilizadas no mercado. Porém os efeitos das suas utilizações nos motores de combustão interna não são completamente estudados e compreendidos. Este trabalho analisa os possíveis efeitos da contaminação do lubrificante, em diferentes graus de contaminação, por Biodiesel de diferentes origens (Animal e Vegetal).

O uso da ferramenta manutenção preditiva está diretamente ligado à boa manutenibilidade do parque industrial, sendo a análise de óleo lubrificante uma de suas ferramentas que garantem a boa qualidade dos componentes internos dos equipamentos. Para motores a combustão interna acionados por ciclo Diesel, o uso dessa ferramenta analisa o tipo de desgaste nos componentes internos e também possibilita uma análise minuciosa nas propriedades do óleo lubrificante utilizado.

O tipo de lubrificante utilizado pode ser um fator determinante para o bom funcionamento do sistema, pois um óleo com uma especificação inadequada pode acarretar em superaquecimento ou desgastes anormais no motor. A utilização do lubrificante correto não descarta o monitoramento do mesmo, pois pode haver contaminação com o combustível utilizado ou com os produtos de sua queima.

Com a contaminação do lubrificante pelo combustível ou com a própria combustão do Biodiesel, o lubrificante pode sofrer alterações físico-químicas, ocasionando assim possíveis desgastes ou outros tipos de consequências ao motor. Para isto o monitoramento através da análise do lubrificante é fundamental.

## 1.2 – ALGUNS TRABALHOS RELACIONADOS

As máquinas térmicas tornaram-se indispensáveis para vários setores da economia, devido a sua importância, muitos estudam maneiras para a obtenção do máximo rendimento desses motores e, com isso, também diminuir as emissões de gases nocivos ao meio ambiente.

Para analisar a eficiência dessas máquinas térmicas pode-se começar pela distribuição da energia química do combustível no sistema, desde o momento onde é disponibilizada, na câmara de combustão, até sua transformação em energia mecânica. Cerca de 30 % da energia química é dissipada pelas superfícies do motor, 30 % vai para a refrigeração do cilindro, 15 % é consumida devido às perdas mecânicas e apenas 25 % é utilizada na produção da potência fornecida pelo motor, conforme Taylor (1988).

Nota-se que cerca de 60 % da energia é dissipada em calor, 15 % em perdas mecânicas e somente 25 % é fornecida ao virabrequim como potência. A partir desta constatação, aliadas às novas políticas energéticas e ecológicas, surgiram novas orientações para os projetos de motores de combustão interna, as quais, de maneira geral, podem ser expressas nas seguintes tendências:

- ✓ Menor consumo energético;
- ✓ Diminuição das emissões;
- ✓ Motores mais compactos, mas com iguais desempenhos ou até superiores.

Para responder a esta demanda, foi escolhida como área de estudos as perdas mecânicas, mais precisamente aquelas causadas por atrito. Num motor de combustão interna, o atrito é responsável pelo desgaste, pela dissipação de energia em forma de calor, ruído e vibração.

Para elementos de máquinas, tem recebido destaque a área de desenvolvimento de novos tipos de lubrificantes que reduzem o atrito, que tem por finalidade o aumento da resistência ao desgaste e a vida útil dos componentes. Dentre eles, os novos óleos multiviscosos que visam contribuir com o potencial dos motores de combustão interna, evidenciando a influência dos diferentes parâmetros físico-químicos do óleo sobre seu comportamento tribológico.

Através da análise do óleo lubrificante, a qual pode ser realizada por diversos métodos, é possível a determinação do desgaste da máquina em operação. Pela intensidade do desgaste verificada no óleo é possível, então, tomar as medidas adequadas para evitar a fratura ou mesmo uma destruição catastrófica do equipamento.

A análise do lubrificante consiste em coletar amostras de óleo em um determinado período de funcionamento do motor e, posteriormente, avaliá-las para determinar tanto o estado do motor quanto do lubrificante (FYGUERO; SÍMON, 1997).

Em um motor detecta-se certo grau de contaminação no óleo devido à presença de partículas de desgaste ou substâncias parecidas. O estado em que o óleo sofre determinada degradação é aquele em que ele perde sua capacidade de lubrificar devido a uma variação das propriedades físicas e químicas de seus aditivos.

A contaminação do óleo lubrificante pode ocorrer em vários níveis e em diferentes formas. Newell (1999) apresenta em seu trabalho algumas das causas mais comuns de contaminação e as conseqüências que essas trazem para o motor. Entre as contaminações mais comuns de se encontrar estão: diluições encontradas nos combustíveis, contaminação por água e poeira. O autor afirma que a presença de água no óleo do motor pode afetar severamente a lubrificação e gerar problemas de corrosão. Enquanto diluições presentes nos combustíveis são contaminações comuns que diminuem seriamente a viscosidade no óleo e acelera o processo de desgaste. A poeira também é um contaminante facilmente encontrado, podendo surgir devido a uma filtração de ar ineficiente, ou ainda de más condições de estoque e manuseio do óleo lubrificante, sendo que um alto nível de presença desse contaminante pode acelerar o processo de desgaste.

Malpica (2007) acrescenta a esta lista de contaminantes partículas ferrosas de desgaste, materiais carbonáceos e insolúveis, e afirma que a degradação pode ser avaliada medindo-se as seguintes propriedades do óleo: viscosidade, detergência e constante dielétrica.

Para identificar condições anormais de desgaste, deve-se estabelecer padrões normais de desgaste para qualquer motor em particular, isso pode ser feito através do uso de *softwares* de tendência de manutenção preditiva. Estabelecer um programa eficiente de manutenção preditiva envolve a análise de óleos lubrificantes novos. Muitos lubrificantes não são necessariamente lubrificantes limpos em relação aos padrões de limpeza exigidos.

Uma das mais importantes técnicas de ensaio de óleo é o monitoramento da viscosidade, pois pequenas mudanças na viscosidade podem trazer danos ao funcionamento do sistema. Sempre que uma mudança significativa na viscosidade do óleo é observada, deve-se identificar a causa do problema e corrigi-lo. Portanto, o monitoramento da viscosidade é uma ferramenta útil que deve ser cuidadosamente utilizada.

Outra forma de monitoramento do óleo bastante utilizada é a ferrografia. Esta técnica consiste no acompanhamento do desgaste do equipamento por meio da análise de partículas presentes no óleo lubrificante (GRANJA, 1999).

Mousa (2006) estudou a morfologia dos contaminantes sólidos e partículas de desgastes retidas nos filtros de óleos após a troca dos mesmos. Sua intenção era a obtenção de informações sobre o desempenho e monitoramento do motor. Concluiu que os filtros contêm informações significantes sobre partículas de desgastes e sobre contaminantes sólidos e que o método adotado é viável, porém há a necessidade da troca do filtro.

Plumley (1998) objetivou a compreensão da contribuição do combustível na formação das partículas e transporte de cinzas, no sentido de estabelecer parâmetros para projetos de filtros de óleos automotivos. Para isto foi medido a emissão de partículas mudando-se o teor de enxofre no combustível e concluiu-se que o combustível com maior teor de enxofre teve maior taxa de emissão.

Raadnuis (2005) descreveu análises simples “*Low-Tech*” para monitoramento de máquinas, dentre as quais motores de combustão interna. Utilizou técnicas simples e de baixo custo para aplicações específicas. Para os motores de combustão interna utilizou a análise de partículas presentes no filtro. Estas foram separadas do filtro através da submersão deste filtro em um solvente com posterior aplicação de limpeza ultrasônica por quinze minutos. Após este procedimento, as partículas foram capturadas através de membranas de policarbonatos com auxílio de vácuo. Através dos formatos das partículas verificou-se o tipo de desgaste que ocorreu no interior do motor.

Borin (2003) propôs metodologias qualitativas para avaliar o grau de degradação para o tipo do lubrificante utilizado e duas metodologias quantitativas para a determinação de contaminantes e parâmetros de qualidade como viscosidade e número de base total. Foi mostrado que estas metodologias, baseadas na espectrometria no infravermelho por reflectância total e quimioterapia, podem ser aplicadas no controle de lubrificantes com o objetivo de tornar as análises mais rápidas, práticas, econômicas, seguras e eficientes. Para a determinação qualitativa das condições dos lubrificantes de motor de um ônibus foram empregadas as cartas de controle multivariadas onde foi possível detectar lubrificantes que ainda estavam em condições de uso e que não tinham a necessidade de serem trocados, evitando assim desperdícios. Para a determinação do tipo de lubrificante automotivo utilizado foi proposta a utilização da Análise de Componentes Principais, através do qual foi possível separar nitidamente quatro tipos de lubrificantes. Para a quantificação dos

contaminantes presentes em lubrificantes automotivos (água, etileno glicol e gasolina) foi empregado o Infravermelho.

Vahaoja (2006) descreveu teoricamente vários tipos de ensaios realizados em máquinas e equipamentos, em seu trabalho descreveu as diferentes técnicas de manutenção preditiva empregadas para diagnosticar problemas em engrenagens e motores, destacou também os pontos positivos e negativos de cada técnica para cada caso de aplicação. Deu maior ênfase a óleos de motores de combustão interna.

Lantos, Lantos e Lantos (2002) descreveram um método parecido com o princípio do método do insolúvel ASTM D 893 “*Insolubles in Used Lubricating Oils*” em motores de combustão interna. Neste método foi utilizado n-heptano e tolueno e mantido em arquivo as tiras de papel absorvente utilizadas para futuras comparações com novas amostras.

Na intenção de avaliar o desempenho de um sensor desenvolvido, Wang (2002), ensaiou motores com dinamômetros e, também em campo. As amostras foram coletadas periodicamente e as medidas de TAN e de viscosidade foram efetuadas. Este pesquisador comparou o TAN medido pela titulometria e por um processo que ele determinou de eletroquímico. O sensor foi submerso em uma amostra de óleo contido em um *becker*, com temperatura controlada através de um forno a 80 °C . Concluindo que o sensor media três estágios de degradação do lubrificante através desta técnica e não apenas a degradação completa e que o sensor deveria ser aperfeiçoado para que sinalizasse o estágio de inutilização do óleo.

Myshkin, et al. (2001), pesquisaram um método para classificar partículas metálicas geradas em motores de combustão interna através das cores. As partículas foram extraídas através do RPD (*Rotary Particle Debris*) e colocadas num microscópio ótico com câmera CCD (*Charge Coupled Device*). Eles concluíram que as partículas analisadas ocupavam diferentes domínios no plano de classificação, que o modelo HSI (*Hue Saturation Intensity*) é o mais apropriado para o processamento das cores e que se pode distinguir partículas baseadas nas ligas de cobre, óxidos vermelhos e escuros e, também, partículas de aço.

Geach (1994) pesquisou um método automático para se medir a diluição dos óleos de motores de combustão interna por combustível, utilizando a técnica de cromatografia gasosa. As amostras foram injetadas no sistema automaticamente, através de um sistema e *software* ligados a um computador instalado na placa de aquisição de dados do cromatógrafo.

Fitch (2005) discutiu os métodos empregados por especialistas na contagem de partículas presentes nos óleos usados de motores de combustão interna. Foram comentados alguns métodos aplicados como a diluição do lubrificante usado com solvente, ou com outro fluido automotivo, ou com fluido hidráulico limpo com posterior passagem do lubrificante por membranas de porosidades conhecidas. Foi concluído que, apesar da pouca aplicação por parte dos laboratórios, a tendência é a utilização da contagem de partículas em motores de combustão interna, não importando o método, sendo o que importa é a tendência dos números medidos e não o valor absoluto, pois cada método empregado apresenta um valor.

Cunha (2005) utilizou a técnica de análise de óleo lubrificante, juntamente com a análise de vibrações em um redutor de velocidades de pequeno porte acoplado a um motor elétrico. O objetivo do estudo era avaliar e diagnosticar falhas provenientes do uso de lubrificante fora das especificações do fabricante no redutor e, ao mesmo tempo, monitorar os sinais de vibração do sistema, proporcionando assim, a otimização da tomada de decisões para a manutenção corretiva no sistema.

Silva (2006) analisou três composições de combustíveis: Diesel puro, B10 (10% em volume de Biodiesel diluído em Diesel) de soja e de nabo forrageiro, analisando as influências dessas misturas sobre as propriedades do lubrificante (viscosidade, contaminação por água e particulados). Em conjunto a esses testes do óleo também foi montado uma bancada de testes dinâmicos a fim de avaliar o desempenho do motor com a utilização de misturas de Biodiesel.

Buscando avaliar misturas de Biodiesel em veículos, Shumacher et al.,(2000), monitoraram o uso da mistura de 0, 1, 2 e 100 % de metil ésteres de Soja em motores de 5,9 litros da marca Cummins. O trabalho teve como objetivo avaliar o comportamento dos motores originais de fábrica com as misturas parciais de Biodiesel. Além disso, análises de espectrografia foram realizadas no lubrificante a fim de mensurar a quantidade de elementos presentes no lubrificante. Como resultado, foram obtidos níveis de alumínio, ferro, cromo e chumbo inferiores dos comparados com motores que utilizavam Diesel comum.

Corrêa et al. (2008) avaliaram em bancada dinâmico o desempenho de um motor de ciclo Diesel com injeção direta, diferentes misturas de Biodiesel de óleo de Girassol B5, B10, B20, B100 e Diesel puro. O estudo analisou o desempenho, consumo de combustível e o óleo lubrificante, para um regime de trabalho variável e rotação constante.

Na análise de óleo realizada, a viscosidade, a quantidade de água e o teor de ferro sofreram aumento com a utilização de B100.

Juliato (2006) comparou o uso de misturas de Biodiesel de origem vegetal (Nabo Forrageiro e Soja), no qual foram utilizados nas proporções de 2 %, 5 %, 10 % e 20 % ao Diesel comercial. Para os testes de desempenho, emissões de gases e consumo específico foi utilizado um motor de pequeno porte de uso agrícola de 9 HP, monocilíndrico, da marca Yanmar. Os resultados de torque, potência e emissões de gases não sofreram alterações significativas quando comparados com o uso de Diesel convencional, já o consumo específico foi alterado a partir do momento em que os níveis de adição de Biodiesel foram aumentados no Diesel convencional, sofrendo um aumento de 5,92 % com o uso do B20.

Nos estudos de Canakci e Van Gerpen (2003) foi mostrado que os níveis de emissões e desempenho de motores, operando com Biodiesel de gordura animal e Biodiesel de Soja, quando comparados com Diesel comum, mantiveram praticamente as mesmas eficiências térmicas, no entanto, o consumo específico foi 13,5 % maior para o Biodiesel de Soja e 14,2 % superior para o Biodiesel de gordura animal. Outro parâmetro observado foram os níveis de emissões de gases, no qual obtiveram-se acréscimos de 13,1 % e 11,6 % para o Biodiesel de Soja e de gordura animal, respectivamente.

Uma caracterização do Biodiesel obtido a partir do sebo bovino foi estudada por Moraes (2008), que promoveu a análise das principais propriedades físico-químicas do combustível. Além disso, o Biodiesel produzido pela rota metálica foi testado em um motor Diesel monocilíndrico da marca Toyama para geração de energia elétrica, onde constatou-se que houve um aumento de 13,7 % no consumo de Biodiesel B100 quando comparado com o Diesel comum.

### **1.3 – OBJETIVOS**

Este trabalho busca avaliar o óleo lubrificante utilizado em testes comparativos em motores de combustão interna estacionários utilizando Biodiesel B100 e Diesel comercial B3, através de análises laboratoriais para verificar as influências sobre as propriedades físico-químicas do óleo lubrificante. Tal avaliação leva em consideração também os níveis de contaminantes sólidos e a morfologia das partículas de desgaste, bem como o consumo específico de combustível em cada ensaio. Para este fim, foram construídos três bancos de ensaios compostos de três motores de combustão interna de ignição por ciclo Diesel, idênticos, novos e operando sobre o mesmo regime de trabalho e condições ambientais.

## 2 – BIODIESEL

### 2.1 – DEFINIÇÃO

Biodiesel é produto resultante da reação química entre óleos vegetais ou gordura animal com o Álcool (Etanol ou Metanol). É um combustível alternativo ao Diesel feito a partir de fontes renováveis. Quimicamente o Biodiesel é conhecido como éster metílico ou etílico de ácidos graxos, dependendo do álcool utilizado (metanol ou etanol).

A definição para Biodiesel adotada na Lei nº 11.097, de 13 de setembro de 2005, que o introduziu na matriz energética brasileira é:

“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”.

No Brasil, a Agência Nacional do Petróleo (ANP), por meio da Portaria nº 255/2003, define Biodiesel como sendo um combustível composto de monoalquilésteres de ácidos graxos de cadeia longa, derivados de óleos vegetais ou de gorduras animais é designado B100.

A União Europeia considera como Biodiesel o éster metílico ou etílico produzido a partir de óleos vegetais ou animais, com qualidade de combustível para motores Diesel, para utilização como biocombustível.

O Biodiesel não contém componentes derivados de petróleo, mas pode ser utilizado puro ou misturado em qualquer proporção com o Diesel mineral para criar uma mistura Diesel/Biodiesel.

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. A Figura 2.1, apresenta um comparativo visual entre o Diesel comum B3 e um Biodiesel puro B100.

O Biodiesel é perfeitamente miscível e físico-quimicamente semelhante ao Diesel mineral, pode ser usado nos motores ciclo Diesel (com ignição por compressão) sem a necessidade de modificação ou onerosas adaptações. O Biodiesel é fácil de usar, biodegradável, não tóxico e, principalmente, livre de enxofre e dos compostos aromáticos.

Como se trata de uma energia limpa, não poluente, e que pode ser usada pura ou misturada com o Diesel mineral em qualquer proporção, o seu uso no motor Diesel

convencional resulta, quando comparado com a queima do Diesel mineral, em uma redução substancial de monóxido de carbono e de hidrocarbonetos não queimados.



Figura 2.1 – Comparativo visual entre Diesel comum e Biodiesel puro B100 específico.

## 2.2 – BREVE HISTÓRICO

### 2.2.1 – O Biodiesel no Mundo

No ano 1900, Rudolph Diesel apresentou um protótipo de motor na Exposição Universal de Paris, o qual foi acionado com óleo de amendoim, cultura que era muito difundida nas colônias francesas na África.

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).

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.

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.

Atualmente, sabe-se que os motores a Diesel podem ser adaptados para utilizar como combustível os óleos vegetais *in natura* (sistema *Elsbett*<sup>1</sup>). No entanto, o método belga de transformação dos óleos parece mais adequado para resolver o problema do transporte, já que não requer qualquer modificação nos motores.

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.

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 maior usina de Biodiesel do mundo fica em Hamburgo, com capacidade para 600 milhões de litros por ano. A Alemanha conta com centenas de postos que vendem o Biodiesel puro (B100), com garantia assegurada dos fabricantes de veículos. O produto é comercializado a preços competitivos se comparado ao óleo Diesel, pois existe a isenção dos tributos na cadeia produtiva desse biocombustível.

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 %).

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.

---

<sup>1</sup> Elsbett é um motor multicomcombustível que pode usar tanto óleo Diesel, como óleos vegetais naturais. É conhecido no Brasil como Motor Elko, que utiliza preferencialmente óleos vegetais em seu funcionamento.

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).

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.

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, 2009).

### **2.2.2 – O Biodiesel no Brasil**

O combustível normalmente utilizado para o transporte de cargas e passageiros no Brasil é o Diesel de petróleo, que era importado em elevada proporção, em função das limitações da capacidade de refino. O aproveitamento dos óleos vegetais transesterificados como combustíveis, permitiria evitar a importação de óleo Diesel, fortalecendo a independência energética do País.

O meio de transporte que mais expandiu no Brasil foi o rodoviário, erroneamente privilegiado como escolha estratégica, pois do ponto de vista da eficiência energética, esse tipo de transporte não é o mais aconselhável. No entanto, os outros modos de transporte

alternativos, como o ferroviário e o hidroviário, também utilizam atualmente o óleo Diesel como principal combustível.

A utilização de combustíveis líquidos obtidos de vegetais cultivados foi novamente lembrada como alternativa interessante para o Brasil nas crises do petróleo de 1973 a 1974 e, especialmente, de 1979 a 1980. Várias universidades brasileiras se dedicaram a estudar a produção de combustíveis substitutivos do óleo Diesel, que aproveitassem diversas matérias primas de origem vegetal. A experimentação com a transesterificação no Brasil foi iniciada na Universidade Federal do Ceará em 1979, com o objetivo de desenvolver as propostas do Prof. Melvin Calvin (Prêmio Nobel de Química), apresentadas no Seminário Internacional de Biomassa, realizado em Fortaleza em 1978 (PARENTE, 2003).

No entanto, a prioridade política foi concedida, naquele momento, para o desenvolvimento do programa do álcool (PROÁLCOOL), que teve seu auge em meados da década de 80. A complexidade de montar um programa de produção, processamento e distribuição do combustível alternativo, sem o apoio oficial, determinou que a crise transcorresse sem que o programa de combustíveis alternativos para o Diesel fosse implantado.

Goldemberg (1988) sinalizou para as vantagens de instalar uma indústria de combustíveis derivados dos óleos vegetais. No entanto, ele alertou para a necessidade da obtenção de bons rendimentos agrícolas, já que, de outra forma, o gasto de energia nas operações de colheita e de transporte da matéria-prima seria muito elevado.

### **2.3 – VANTAGENS DO BIODIESEL**

Sendo esse tipo de combustível não poluente, traz-se assim um grande benefício para o meio ambiente. A emissão de CO<sub>2</sub>, 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).

As vantagens econômicas passam pela redução das importações de petróleo e de Diesel, além disso, proporciona o incentivo a agricultura familiar nas regiões mais carentes do país.

Em 2008, o Brasil deixou de gastar com importações de óleo Diesel o equivalente a US\$ 976 milhões (ANP, 2009).

## **2.4 – DESVANTAGENS DO BIODIESEL**

Entre as desvantagens do Biodiesel podem ser citadas:

- ✓ **Cristalização em baixas temperaturas:** Em regiões de clima muito frio, a viscosidade do Biodiesel aumenta bastante. 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.
- ✓ **Emissões de NO<sub>x</sub>:** 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. O NO<sub>x</sub> é um grande responsável pela baixa qualidade do ar. A boa notícia é que com o uso de aditivos ou alteração nos motores as emissões diminuem consideravelmente.
- ✓ **Limpeza dos bicos injetores:** Nos motores que sempre usaram o Diesel, pode ocorrer, nos primeiros abastecimentos com Biodiesel, a liberação de sujeiras e resíduos acumulados no tanque. Assim, é recomendada uma limpeza do tanque de combustível e a troca do filtro quando iniciar o uso de Biodiesel e quando completar 100 horas uma nova troca do filtro de óleo é necessária.
- ✓ **Preço:** Economicamente inviável do Biodiesel puro B100.

## **2.5 – MARCO REGULATÓRIO NO BRASIL E ÓRGÃOS REGULADORES**

A **Lei 11.097/2005** estabelece percentuais mínimos de mistura de Biodiesel ao Diesel e o monitoramento da inserção do novo combustível no mercado, conforme mostra a Figura 2.2.



Figura 2.2 – Marco regulatório do uso do Biodiesel ( 2009, <http://www.mme.gov.br>)).

O Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) antecipou por meio da Resolução nº 3, de 23 de setembro de 2005, o prazo para o atendimento do percentual mínimo intermediário de 2% ao Diesel para o início de 2006 (SEBRAE, 2008).

A lei estabeleceu que a partir de 01/01/2008 a adição obrigatória de 2% de Biodiesel ao Diesel de petróleo e também prevê a possibilidade de antecipação dos prazos estabelecidos, a ser determinada por resolução do CNPE. Para ser autorizada uma antecipação dos prazos pelo CNPE faz-se necessário que o segmento de Biodiesel e as demais áreas correlacionadas a ele atendam os seguintes critérios:

- a) A disponibilidade de oferta de matéria-prima e a capacidade industrial para produção de Biodiesel;
- b) A participação da agricultura familiar na oferta de matérias-primas;
- c) A redução das desigualdades regionais;
- d) O desempenho dos motores com a utilização do combustível;
- e) As políticas industriais e de inovação tecnológica.

A resolução nº 2 do CNPE de 13 de março de 2008, estabeleceu a adição obrigatória de 3% de Biodiesel ao Diesel a partir de 01/07/2008, para cada 1 % de volume de Biodiesel adicionado ao óleo Diesel, torna-se necessário o aumento de produção de aproximadamente 420 milhões de litros, elevando o consumo total de Biodiesel para a ordem de 1,26 bilhões de litros (MME, 2008).

Em maio de 2009, o CNPE, através da resolução 02/2009, ampliou a proporção de Biodiesel de 3% para 4% adicionado ao Diesel a partir de julho de 2009, tornando assim, o Brasil um dos maiores produtores e consumidores do mundo, saltando de uma capacidade instalada de produção de 1,2 bilhões de litros em 2008 para cerca de 3,7 bilhões de litros em janeiro de 2009 (ANP, 2009).

Os órgãos reguladores do Biodiesel no Brasil são:

CNPE – Conselho Nacional de Política Energética, um órgão de assessoramento do presidente da República que tem como atribuição a formulação de políticas e diretrizes de energia;

MME – Ministério de Minas e Energia, com a responsabilidade pela execução da política energética;

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás e Biocombustíveis, com delegação para regular o mercado do segmento Biodiesel com as mesmas funções da regulação, da contratação e da fiscalização das atividades econômicas integrantes da indústria do petróleo, do gás natural e dos biocombustíveis;

MDA – Ministério de Desenvolvimento Agrário, com a missão de conceder o Selo Combustível Social;

MAPA – Ministério de Agricultura, Pecuária e Abastecimento, com a responsabilidade pelo zoneamento agrícola.

## **2.6 – MATÉRIAS PRIMAS**

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).

Alguns atributos no aspecto agrônômico devem ser considerados no momento de escolher a matéria-prima para o Biodiesel, destacando-se:

- ✓ Teor de óleo e qualidade do farelo e torta;
- ✓ Produção por unidade de área;
- ✓ Atendimento a diferentes sistemas produtivos;
- ✓ Ciclo da planta (sazonalidade);
- ✓ Conhecimento do sistema de produção;

- ✓ Equilíbrio agronômico.

Em relação aos aspectos tecnológicos, devem ser levados em conta:

- ✓ Teor de ácidos graxos poli-insaturados;
- ✓ Tipo e teor de ácidos graxos saturados;
- ✓ Complexidade do processo de extração;
- ✓ Presença de outros componentes no óleo;
- ✓ Valor agregado de co-produtos.

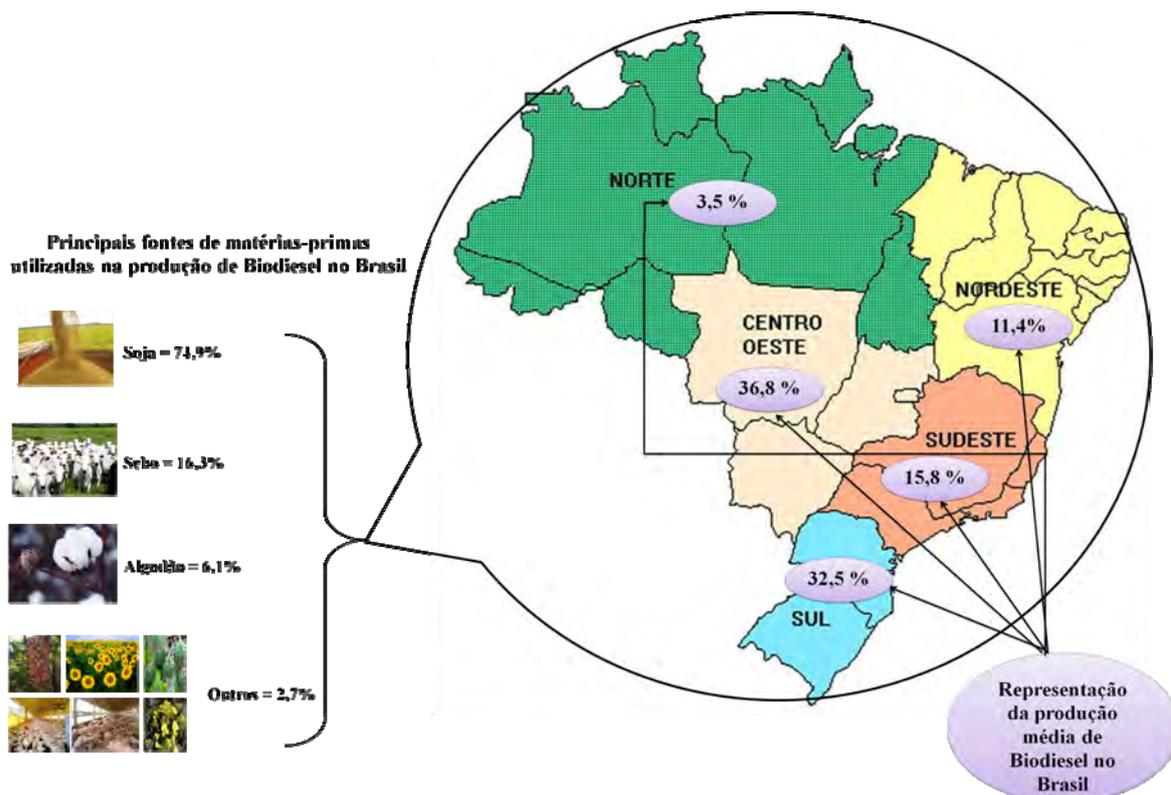
Na Tabela 2.1 são destacados os principais insumos vegetais para a produção de Biodiesel no Brasil destacando os teores de óleo extraídos de cada tipo de cultura.

**Tabela 2.1 – Matérias-primas vegetais para produção de Biodiesel no Brasil (IBGE, 2009).**

<b>Produto</b>	<b>Teor de óleo (%)</b>	<b>Área plantada, 2008 (mil Hectares)</b>	<b>Produção 2008 (mil toneladas)</b>
<b>Soja</b>	20	21.300	60.000
<b>Girassol</b>	44	108,104	144,601
<b>Dendê</b>	22	60	120
<b>Mamona</b>	48	158,7	119,147
<b>Babaçu</b>	66	17.000	10.000
<b>Algodão</b>	14-18	812,2	2.943,1

No caso, a mamona possibilita a agricultura familiar em regiões mais carentes do país, porém, existem algumas restrições como a viscosidade, a toxicidade e o desenvolvimento de sistemas de produção. Já a cultura do dendê possui um grande potencial, porém se trata de uma cultura de alto impacto ambiental e possui restrições como a logística, exigência hídrica e alto custo de implantação.

A Figura 2.3 demonstra os tipos de matérias-primas predominantes no Brasil, é incorporado também o percentual de produção meia de Biodiesel em cada região do País.



**Figura 2.3 – Principais Matérias-Primas para produção de Biodiesel juntamente com porcentagem da produção média por região (Adaptado de MME, 2009).**

O Brasil é considerado um dos maiores produtores de bovinos e tem como objetivo também utilizar as gorduras animais para a produção de Biodiesel, uma usina instalada em 2008 pelo grupo Bertin na cidade de Lins (SP) já esta produzindo Biodiesel a partir dessa fonte. No Brasil a produção anual de sebo bovino atinge a marca de 600 mil toneladas.

## 2.7 – TECNOLOGIA DE PRODUÇÃO

Dentre os diversos processos utilizados para a obtenção do Biodiesel destaca-se o processo de transesterificação, conforme o fluxograma apresentado na Figura 2.4.

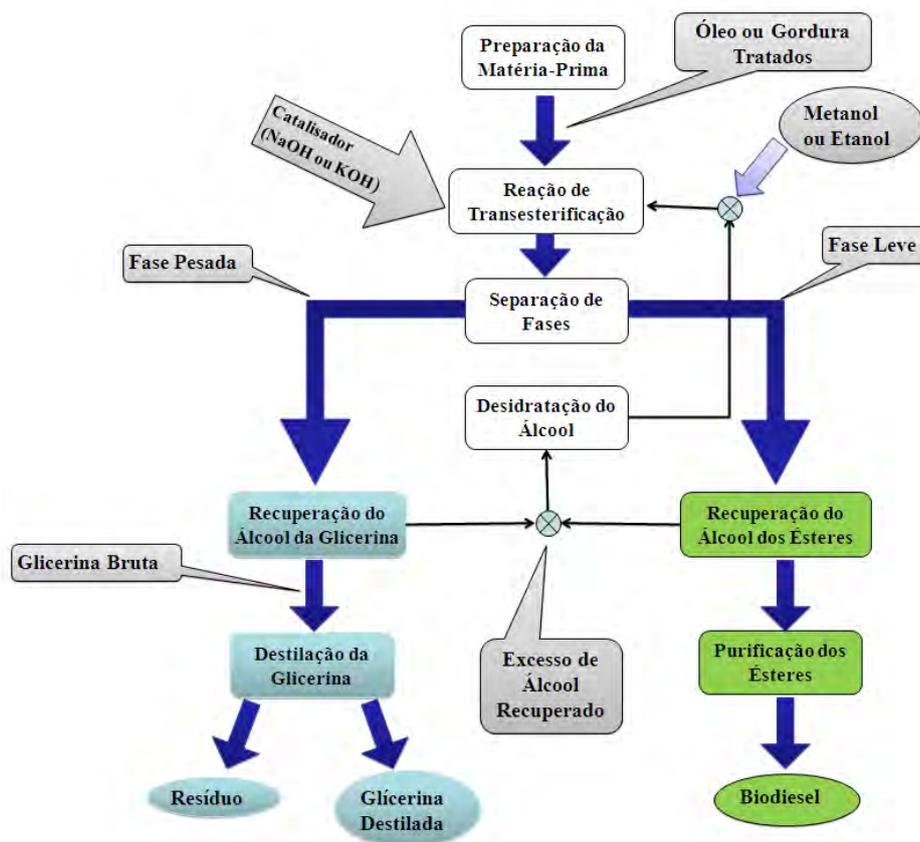


Figura 2.4 – Esquema de transesterificação (PARENTE, 2003).

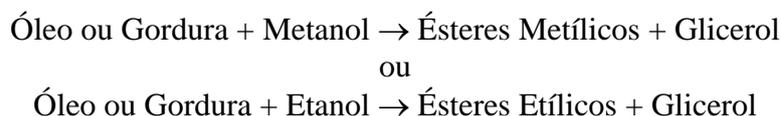
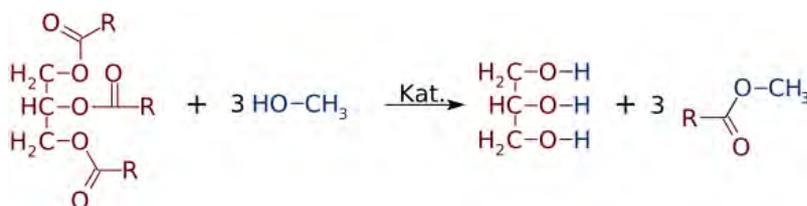
### 2.7.1 – Preparação da Matéria-Prima

Os procedimentos concernentes à preparação da matéria-prima para a sua conversão em Biodiesel visa criar as melhores condições para a reação de transesterificação, com a máxima taxa de conversão.

Em princípio, se faz necessário que a matéria prima tenha o mínimo de umidade e de acidez, o que é possível submetendo-a a um processo de neutralização, através de uma lavagem com uma solução alcalina de hidróxido de sódio ou de potássio, seguida de uma operação de secagem ou desumidificação.

### 2.7.2 – Transesterificação

A reação de transesterificação é a etapa da conversão, propriamente dita, do óleo ou gordura, em ésteres metílicos ou etílicos de ácidos graxos, que constitui o Biodiesel. A reação pode ser representada pela seguinte equação química.



As duas reações acontecem na presença de um catalisador, o qual pode ser empregado, o hidróxido de sódio (NaOH) ou o hidróxido de potássio (KOH), usados em diminutas proporções. A diferença entre eles, com respeito aos resultados na reação, é muito pequena. Por outro lado, no Brasil o hidróxido de sódio é muito mais barato que o hidróxido de potássio. Pesando as vantagens e desvantagens é muito difícil decidir, genericamente, o catalisador mais recomendado e, dessa forma, por prudência, essa questão deverá ser analisada para cada caso.

### 2.7.3 – Separação de fases

Após a reação de transesterificação que converte a matéria graxa em ésteres (Biodiesel), a massa reacional final é constituída de duas fases, separáveis por decantação e/ou por centrifugação.

A fase mais pesada é composta de glicerina bruta, impregnada dos excessos utilizados de álcool, de água, e de impurezas inerentes à matéria prima. A fase menos densa é constituída de uma mistura de ésteres metílicos ou etílicos, conforme a natureza do álcool originalmente adotado, também impregnado de excessos reacionais de álcool e de impurezas.

### 2.7.4 – Recuperação do Álcool da Glicerina e dos Ésteres

A fase pesada, contendo água e álcool, é submetida a um processo de evaporação, eliminando-se da glicerina bruta esses constituintes voláteis, cujos vapores são liquefeitos num condensador apropriado.

Da mesma forma, mas separadamente, o álcool residual é recuperado da fase mais leve, liberando para as etapas seguintes, os ésteres metílicos ou etílicos.

### **2.7.5 – Desidratação do Álcool**

Os excessos residuais de álcool, após os processos de recuperação, contêm quantidades significativas de água, necessitando de uma separação. A desidratação do álcool é feita normalmente por destilação.

No caso da desidratação do metanol, a destilação é bastante simples e fácil de ser conduzida, uma vez que a volatilidade relativa dos constituintes dessa mistura é muito grande, e ademais, inexistente o fenômeno da azeotropia para dificultar a completa separação.

Diferentemente, a desidratação do etanol complica-se em razão da azeotropia, associada à volatilidade relativa não tão acentuada como é o caso da separação da mistura metanol – água.

### **2.7.6 – Purificação dos Ésteres**

Os ésteres deverão ser lavados por centrifugação e serem desumidificados posteriormente resultando o Biodiesel, o qual deverá ter suas características enquadradas nas especificações das normas técnicas estabelecidas para uso como combustível em motores de ciclo Diesel.

### **2.7.7 – Destilação/Purificação do Glicerol**

A glicerina bruta (glicerol), emergente do processo, mesmo com suas impurezas convencionais, já constitui o subproduto vendável. No entanto, o mercado é muito mais favorável à comercialização da glicerina purificada, quando o seu valor é realçado.

A purificação da glicerina bruta é feita por destilação à vácuo, resultando um produto límpido e transparente, denominado comercialmente de glicerina destilada.

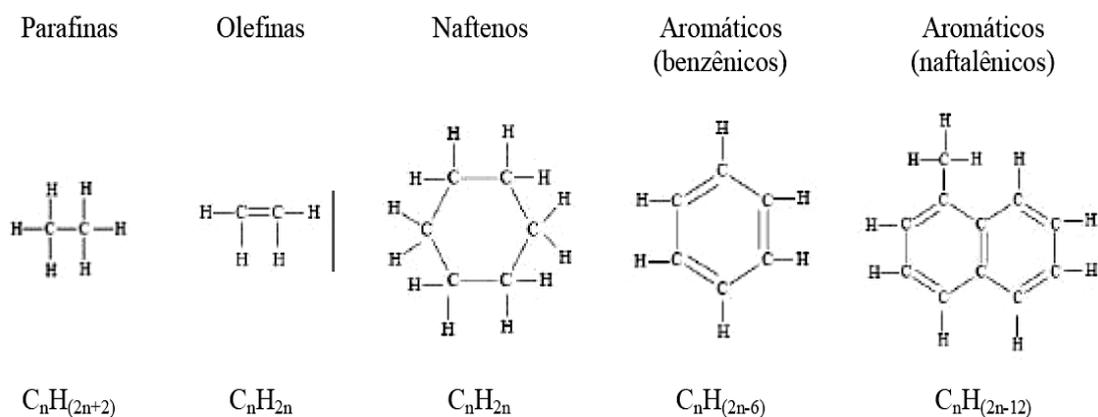
## **2.8 - CARACTERÍSTICAS DO DIESEL**

O óleo Diesel é uma mistura composta basicamente de hidrocarbonetos, que são moléculas orgânicas formadas por átomos de carbono e hidrogênio, e por uma pequena porção formada por átomos de enxofre, nitrogênio, metais e oxigênio. Os hidrocarbonetos variam por classe e, dentro de cada classe, pelo tamanho das moléculas. As classes diferem na razão de átomos de hidrogênio e de carbono e, também, no arranjo dos átomos. Uma classe constitui uma família de hidrocarbonetos que compartilham alguma característica estrutural (OBERT, 1971).

As quatro classes principais de hidrocarbonetos são:

- ✓ Parafínica: compõe-se de hidrocarbonetos de cadeia, com ligações simples entre dois átomos de carbono;
- ✓ Olefinas: possuem cadeia aberta e uma dupla ligação;
- ✓ Naftenos: apresentam cadeia cíclica com ligações simples, com proporção de átomos de carbono e hidrogênio idêntica a das olefinas de fórmula geral;
- ✓ Aromáticos: são os que possuem estrutura em anéis com seis átomos de carbono (alternando ligações simples e duplas entre os carbonos do anel ou dos anéis), podendo apresentar ramificações com átomos de carbono e hidrogênio. Os aromáticos se dividem em benzênicos e naftalênicos (PENIDO FILHO, 1983 *apud* SILVA, 2006).

A Figura 2.5 demonstra as principais cadeias de hidrocarbonetos que compõem a estrutura molecular do Diesel.



**Figura 2.5 – Estruturas básicas dos hidrocarbonetos (SILVA, 2006).**

O Diesel possui a característica de ser inflamável, mediamente tóxico, com odor forte característico e límpido. A portaria da ANP nº 310, de 27/12/2001, estabelece as especificações para a comercialização do óleo Diesel automotivo em todo o território nacional, sendo esta resolução alterada em 22/03/2007 pela ANP nº 12 que estabelece os dois tipos de Diesel comercializados, o Diesel metropolitano e o Diesel tipo interior.

Segundo dados da ANP, em 2008 o consumo estimado de Diesel foi de 45 bilhões de litros, no qual, a produção interna do combustível atingiu a casa dos 40,6 bilhões de litros e com uma importação de cerca de 5,8 bilhões de litros (ANP, 2009).

## 2.9 – COMPARATIVO DIESEL X BIODIESEL

A Tabela 2.2 proporciona a comparação das principais características entre o Biodiesel e o Diesel comum, vale ressaltar que no Biodiesel, a ausência dos níveis de enxofre, e a biodegradabilidade muito alta quando comparada com o Diesel comum.

O ponto de fulgor do Diesel é inferior ao do Biodiesel, sendo assim, um fator de segurança para o manuseio e armazenagem do combustível.

Tabela 2.2 – Quadro comparativo das propriedades do Diesel com o Biodiesel (DABDOUB, 2006).

Propriedades	Biodiesel	Diesel
<b>Cetanagem</b>	51-62	44-47
<b>Lubricidade</b>	Maior que o Diesel	Baixo fator de lubricidade
<b>Biodegradabilidade</b>	Alta	Muito baixa
<b>Toxicidade</b>	Não tóxico	Altamente tóxico
<b>Oxigênio</b>	11 % de oxigênio livre	Muito baixo
<b>Aromáticos</b>	Não possui	18-22%
<b>Enxofre</b>	Nenhum	0,05%
<b>Ponto de névoa</b>	Próximo ao do Diesel	
<b>Contaminação por derramamento</b>	Baixo	Muito alto
<b>Ponto de ignição</b>	148-204 °C	52 °C
<b>Compatibilidade com outros materiais</b>	Degradação natural de polímeros butílicos	Efeito não natural em polímeros butílicos
<b>Transferência e estocagem</b>	Nenhum risco em nenhuma das atividades	Altamente perigoso
<b>Valor calorífico</b>	2 % maior que o Diesel	
<b>Suprimento</b>	Renovável	Não renovável
<b>Combustível alternativo</b>	Sim	Não
<b>Processo produtivo</b>	Reação química	Reação química e fracionamento
<b>Composição química</b>	Ésteres de alquila (metila, Etila)	Hidrocarbonetos

## 2.10 - PROPRIEDADES X DESEMPENHO DO MOTOR DIESEL

A Tabela 2.3 exemplifica as principais consequências em um motor que utiliza um combustível com as propriedades físico-químicas alteradas. Sendo assim, alterações na viscosidade influem na lubricidade e na atomização do sistema de injeção, contaminações por água e sedimentos também provocam sérios danos ao sistema de injeção, além de proporcionar a troca prematura do filtro de combustível, facilitar a corrosão do sistema e promover o acúmulo de sedimentos no tanque de combustível.

**Tabela 2.3 – Influência das propriedades do combustível no motor.**

<b>PROPRIEDADE</b>	<b>O QUE É?</b>	<b>O QUE AFETA?</b>
<b>Densidade</b>	Massa contida em determinado volume	Potência, emissões e economia de combustível.
<b>Viscosidade</b>	Tempo de escoamento do combustível em capilar padronizado	Atomização, lubrificação do sistema de injeção.
<b>Destilação</b>	Faixa de temperatura de vaporização à pressão atmosférica	Potência, fumaça, depósitos no motor
<b>Número de Cetano</b>	Qualidade de ignição	Fumaça, partida a frio, ruído, economia de combustível, emissões.
<b>Teor de enxofre</b>	Enxofre total presente	Desgaste de cilindros e anéis, depósitos no motor, emissões
<b>Ponto de fulgor</b>	Temperatura mais baixa na qual o produto se vaporiza em quantidade suficiente para formar uma mistura inflamável com ar	Segurança, sistema de injeção tamponamento.
<b>Corrosividade ao cobre</b>	Potencial de corrosividade do produto face a presença de enxofre e seus derivados	Vida útil dos tanques, linhas e partes internas do motor.
<b>Ponto de entupimento</b>	Temperatura de início de cristalização de parafinas	Entupimento de filtro, escoamento de combustível.
<b>Água e sedimentos</b>	Contaminação com água e impurezas	Entupimento de filtro, desgaste de bomba, desgaste de bico injetor, borra no tanque, corrosão, combustão.

### 3 – MOTORES A COMBUSTÃO INTERNA

#### 3.1 - DEFINIÇÃO

O conceito de motores a combustão interna deriva-se do conceito de máquinas térmicas, que podem ser classificadas de acordo com o tipo de combustão que ocorre. No presente estudo destacam-se as máquinas térmicas por combustão endotérmica, ou seja, a reação de queima do combustível é realizada dentro do sistema.

Os motores de combustão interna são máquinas responsáveis pela transformação de energia calorífica em energia mecânica diretamente utilizável, energia calorífica essa proveniente de diversas fontes como: energia elétrica, atômica, química, dentre outras.

#### 3.2 - CLASSIFICAÇÃO

Os Motores de Combustão Interna podem ser classificados:

- ✓ Quanto ao ar de admissão;
- ✓ Quanto ao tipo de ignição;
- ✓ Quanto ao movimento do pistão;
- ✓ Quanto ao ciclo de trabalho;
- ✓ Em relação ao número de cilindros;
- ✓ Quanto à disposição dos cilindros;
- ✓ Quanto à utilização.

Em relação à propriedade do ar de admissão, existem dois tipos: os motores que trabalham admitindo somente ar (ciclo Diesel) e os que aspiram uma mistura ar-combustível (ciclo Otto).

Relacionando o motor quanto ao seu tipo de ignição destacam-se a ignição por centelha (ICE), utilizada em motores que trabalham com o ciclo Otto, e a ignição que trabalha por compressão (ICO), utilizada em motores Diesel.

Os cilindros do motor podem possuir as seguintes configurações de trabalho:

- ✓ Monocilíndricos ou policilíndricos: Os motores podem trabalhar com um ou mais cilindros dependendo da atividade e necessidade do trabalho a ser efetuado;
- ✓ Movimento alternativo ou rotativo: Os alternativos são os mais utilizados (ciclo Otto-Diesel) e os que trabalham em regime rotativo (Walkel, Quasiturbine);

- ✓ Dois ou quatro tempos: Correspondem aos tempos de Admissão, Expansão, Combustão e Escape dos gases;
- ✓ Em linha, opostos ou em V: Nomenclatura referente à disposição dos cilindros no motor.

O tipo de utilização ou regime de trabalho classifica os motores em:

- ✓ Estacionários: Destinados ao acionamento de máquinas estacionárias, tais como geradores, máquinas de solda, bombas ou outras máquinas que operam em rotação constante;
- ✓ Industriais: Destinados ao acionamento de máquinas de construção civil, tais como tratores, carregadeiras, guindastes, compressores de ar, máquinas de mineração, veículos de operação fora-de-estrada, acionamento de sistemas hidrostáticos e outras aplicações onde se exijam características especiais específicas do acionador;
- ✓ Veiculares: Destinados ao acionamento de veículos de transporte em geral, tais como caminhões e ônibus;
- ✓ Marítimos: Destinados à propulsão de barcos e máquinas de uso naval.

### **3.3 – PRINCÍPIO DE COMBUSTÃO EM UM MOTOR DIESEL**

No motor Diesel, o ar de admissão é comprimido até uma relação de volume de 12 a 20 vezes e o combustível é injetado no cilindro próximo ao ponto morto superior (TAYLOR, 1988).

Com o ar comprimido em uma alta temperatura, a massa de combustível atomizado entra na câmara de combustão e vaporiza-se rapidamente, formando, assim, uma mistura com os elementos principais para a combustão, desencadeia-se uma série de reações químicas espontâneas sobre o carburante (combustível), comburente (oxigênio do ar) e fonte de ignição (temperatura do ar de admissão).

#### **3.3.1 – Processo por injeção**

O gás de combustão aspirado ou induzido sob pressão é comprimido a pressões superiores a 12 atm (temperatura entre 550 e 600 °C), que se dá a auto-ignição. Uma parte do combustível, injetado em primeiro lugar, queima rapidamente e o que é injetado em seguida, em maior quantidade, queima a pressão aproximadamente constante. A combustão não ocorre inteiramente, caso não se sucedam no tempo certo o aquecimento do combustível e a ignição. A injeção começa antes de o pistão atingir o PMS (ponto

morto superior), no tempo de compressão. Só se consegue uma boa combustão quando há a melhor mistura possível entre as gotículas de combustível e o ar necessário à combustão.

Para tanto, são necessários, entre outras coisas:

- ✓ A adequação do jato de combustível à forma da câmara de combustão (com ou sem repartições);
- ✓ Quantidade, disposição, comprimento e força dos jatos;
- ✓ Tamanho das gotículas;
- ✓ Turbilhonamento mais intenso do ar de combustão;
- ✓ Forma do pistão;
- ✓ Câmara de combustão repartida, com câmaras de ar, pré-câmaras, ou câmaras de turbilhonamento e também fluxo de ar tangencial.

### **3.3.2 – Ignição**

Pode não se dar uma sensível vaporização do combustível Diesel, de elevado ponto de ebulição, devido à rapidez do processo. As gotículas de combustível que são injetadas, inflamam-se após terem sido levadas à temperatura de auto-ignição pelo ar pré-aquecido e comprimido no cilindro.

O intervalo de tempo entre a injeção e a ignição deve estar sincronizado com a calagem da árvore de manivelas correspondente a elevação adequada de pressão. O retardo da ignição deve ser o mínimo possível, caso contrário, chega à câmara de combustão uma quantidade excessiva de combustível não queimado que irá produzir aumento de pressão no próximo tempo de compressão e reduzir a lubrificação entre as camisas dos cilindros e os anéis de segmento, resultando, com a continuidade do processo, em desgaste, que num primeiro momento, é conhecido como "espelhamento" das camisas dos cilindros.

Combustíveis Diesel com boa ignição possuem um pequeno retardo, proporcionam compressão uniforme para a combustão e operação suave do motor. O retardo da ignição depende do tipo de combustível, pressão e temperatura na câmara de combustão.

### **3.3.3 – Retardo da injeção**

O retardo da injeção é medido pela calagem da árvore de manivelas, é o intervalo de tempo necessário ao pistão da bomba de injeção para levar a quantidade de combustível situada entre a canalização da bomba e o assento da válvula de injeção (bico injetor), à pressão de injeção. Infelizmente é quase impossível, especialmente nos motores de funcionamento rápido, controlar de maneira satisfatória o processo de combustão ("Lei de

aquecimento") e a variação da pressão durante a combustão mediante o início e o desenvolvimento da injeção, a não ser com baixa compressão, que, por outro lado, diminui o rendimento e se opõe frontalmente ao princípio do motor Diesel.

No tempo de alguns centésimos de segundo entre o começo da injeção e a ignição, uma parte importante da quantidade injetada penetra na câmara de combustão e se inflama rápida e simultaneamente com o imprevisto aumento de pressão. Além disso, durante a ignição na fase fluida se formam peróxidos com um indesejável caráter explosivo. Estas "batidas" dão aos carburantes um maior retardamento de ignição, o que é impróprio para motores Diesel.

A potência gerada no motor é controlada pelo volume de combustível injetado dentro do cilindro, sendo a relação ar/combustível na mistura comandada pelo acelerador.

Controlando adequadamente o combustível no momento da injeção na câmara de combustão, se obtém uma alta potência e alta eficiência, baixo nível de emissões e baixo consumo de combustível. O tempo decorrido entre o início da injeção de combustível na câmara de combustão e o início da auto-ignição do óleo combustível é denominado "atraso de ignição".

O atraso de ignição promove nos motores um acúmulo de combustível na câmara de combustão, provocando um barulho vulgarmente chamado de "batida de bico", quanto mais baixas forem:

- ✓ A temperatura do ar de admissão;
- ✓ A temperatura da água do sistema de arrefecimento;
- ✓ A temperatura no interior da câmara de combustão;
- ✓ O número de cetano do combustível.

Em contrapartida, um baixo retardo de ignição proporciona uma "boa qualidade de ignição", facilitando, assim, a partida do motor e uma consequente melhora de potência.

Segundo Almeida (1980) *apud* Silva (2006) a combustão nos motores Diesel ocorre em três fases mostradas na Figura 3.1, onde o início da injeção ocorre exatamente no ponto morto superior (Fig. 3.1 a), sendo o combustível injetado 40 graus antes do ponto morto superior (Fig. 3.1 b). Na primeira fase é considerado um período inicial onde não ocorre praticamente nenhuma combustão e o combustível tem sua temperatura elevada até o seu ponto de auto-ignição. Na segunda fase, o combustível é queimado rapidamente no momento em que foi injetado no primeiro período, e na terceira fase inflama-se instantaneamente o restante do combustível a medida que é injetado nos gases

inflamados.

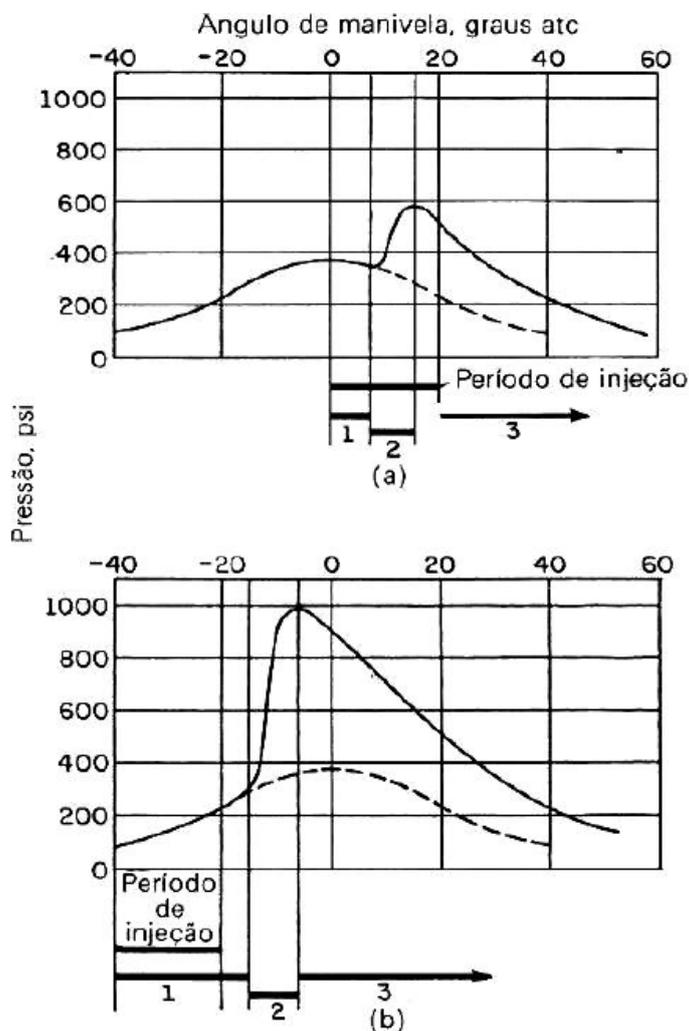


Figura 3.1 – Relação pressão e combustão (SILVA, 2006).

### 3.4 – TIPOS DE INJEÇÃO DE COMBUSTÍVEL

Segundo Challen e Baranescu (1999), nos motores de ignição por compressão, o motor opera com uma carga heterogênea previamente comprimida de ar e um *spray* de combustível líquido. O último é injetado dentro do cilindro no final da compressão, quando, assim, as propriedades auto-ignição do combustível causam o início da combustão a partir de pequenos núcleos, garantindo, assim, uma combustão completa da mistura ar-combustível. O processo de mistura é crucial para o funcionamento do motor Diesel e, como tal, tem recebido uma grande atenção, que é refletida em uma grande variedade de sistemas de combustão que podem ser convenientemente agrupados em duas grandes categorias.

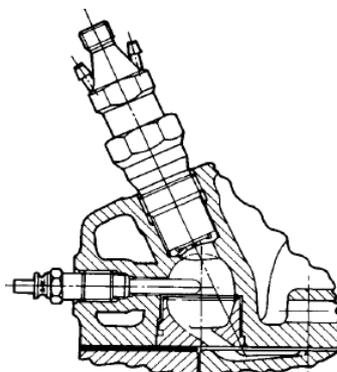
### 3.4.1 – Injeção indireta

Uma pequena parte da câmara de combustão (antecâmara) é separada da parte principal mediante um estreitamento. O combustível é injetado com uma pressão de 80 a 120 atm por uma bomba dosificadora a êmbolo com funcionamento excêntrico, dependendo do projeto do motor, ocorre a queima parcial desse combustível e com a formação da sobre-pressão instantânea a mistura é injetada na câmara principal de combustão com um efeito de pulverização turbulento através do canal de disparo.

As paredes da antecâmara, sobretudo o ponto de impacto do jato entrante, são mantidas com a temperatura mais elevada possível, pois, desta forma, auxiliam na preparação e ignição do combustível.

Embora se observe a vantagem da redução de gases prejudiciais a saúde, neste tipo de sistema produz-se muita perda de calor devido à multiplicação de superfícies de permutação, o que resulta em maior consumo específico de combustível, sendo, portanto, um processo pouco utilizado nos motores modernos.

As Figuras 3.2 e 3.3 demonstram os tipos de antecâmaras de injeção indireta do tipo esférico e antecâmara direta.



**Figura 3.2 – Antecâmara tipo esférico (CHALLEN; BARANESCU, 1999).**

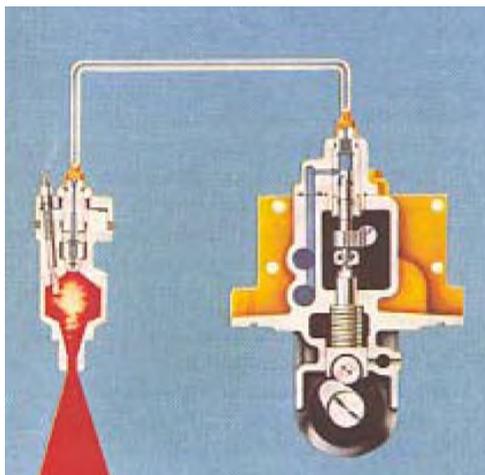


Figura 3.3 – Sistema de injeção com antecâmara (2009 <<http://sotreq.com.br/artigostecnicos/diesel.pdf>>).

### 3.4.2 – Injeção direta

O combustível é injetado diretamente sobre a cabeça do pistão mediante um bico injetor, com um ou vários pequenos furos (diâmetros de 0,1 a 0,3 mm) direcionados segundo um ângulo apropriado. Funciona com pressões muito elevadas (até 400 atm) para conseguir uma pulverização muito fina e uma distribuição adequada do combustível no ar de carburação. O jato único forma uma neblina composta de gotas minúsculas que costuma se inflamar em primeiro lugar na proximidade de entrada. A formação da mistura é acelerada e melhorada quando o ar de admissão executa um movimento rápido em relação à névoa do combustível.

A maioria dos motores modernos utiliza o processo de injeção direta de combustível, em virtude do seu melhor rendimento térmico.

A Figura 3.4 exemplifica o modelo construtivo de injeção direta comum em motores quatro tempos e dois tempos, e, na Figura 3.4b é demonstrado o modelo construtivo mais utilizado atualmente nos motores de caminhões e veículos pequenos.

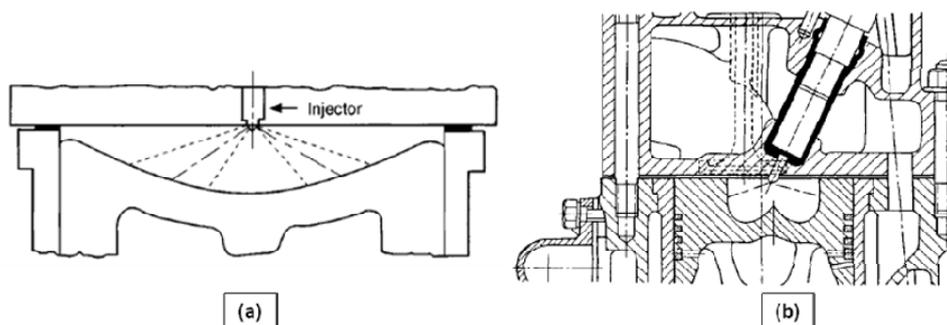


Figura 3.4 – Processo de injeção direta (adaptado de CHALLEN; BARANESCU, 1999).

Muitas pesquisas estão sendo desenvolvidas sobre o processo da combustão em motores Diesel. Inicialmente, acreditava-se que ocorria uma explosão no interior do cilindro, razão pela qual os motores de combustão interna eram também chamados de motor a explosão. Por meio de observações, testes diversos, tentativas, erros e acertos, os componentes do sistema de injeção estão sendo aperfeiçoados em seus desenhos, preservando, no entanto, o que de melhor se alcançou em termos de resultados com o processo de injeção direta. Recentemente, descobriram-se mais detalhes do processo de combustão e isto certamente acarretará novos desenvolvimentos.

### 3.5 – MOTORES QUATRO TEMPOS

Em um motor de quatro tempos, a árvore de cames é orientada para girar na metade da velocidade do virabrequim. Isto significa que o virabrequim deve fazer duas voltas completas antes da árvore de cames completar uma revolução, conforme mostra a Figura 3.5.

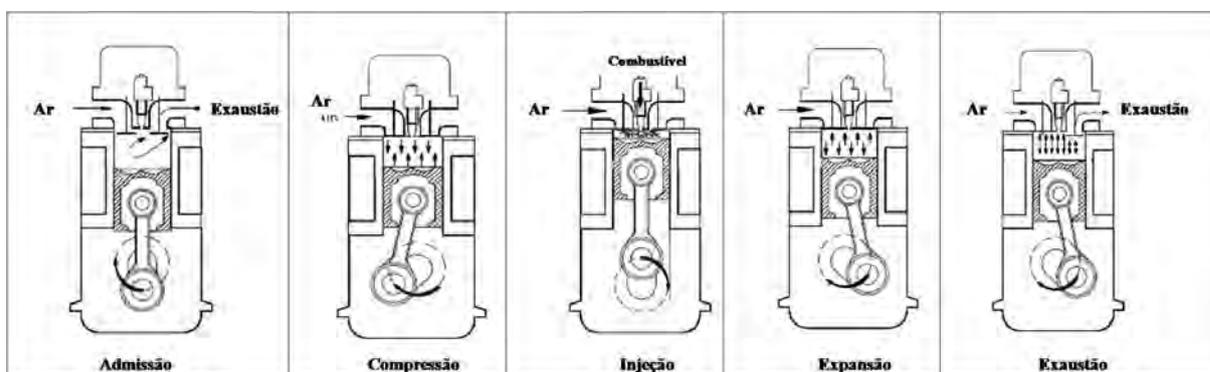


Figura 3.5 – Processos do ciclo Diesel quatro tempos (MECHANICAL SCIENCE, 1993).

No primeiro tempo, com o pistão em movimento descendente, dá-se a admissão, que se verifica, na maioria dos casos, por aspiração automática da mistura ar-combustível (nos motores Otto), ou apenas ar (motor Diesel).

No segundo tempo, ocorre a compressão, com o pistão em movimento ascendente. Pouco antes de o pistão completar o curso, ocorre a ignição por meio de dispositivo adequado (no motor Otto), ou a auto-ignição (no motor Diesel).

No terceiro tempo, com o pistão em movimento descendente, tem-se a ignição, com a expansão dos gases e transferência de energia ao pistão (tempo motor). A temperatura chega a torno de 1280 °C, com conseqüente aumento da pressão nesse estágio.

No entanto, a energia produzida no processo de combustão não é aproveitada em sua totalidade, em motores de quatro tempos de ignição por compressão, a distribuição térmica é de 42 % convertido em trabalho útil, 28 % do calor é rejeitado para o sistema de arrefecimento, e 30% do calor rejeitado o escape (MECHANICAL SCIENCE, 1993).

No quarto tempo, o pistão, em movimento ascendente, empurra os gases de escape para a atmosfera.

Os motores Diesel sofreram algumas alterações de componentes no que se refere a melhoria da combustão e emissões de gases para atender as atuais legislações ambientais (EURO/EPA). Os atuais motores eletrônicos e EGR (*Exhaust Gas Recirculation*), que também geram fuligem devido a recirculação dos gases, foram desenvolvidos pelos principais fabricantes de motores para utilitários e caminhões.

A fuligem, gerada devida a má combustão e através dos gases gerados (*blowby*), penetra entre o cilindro e camisas, influenciando diretamente o desempenho do lubrificante, que, no Carter, é contaminado. Por isso, existe a necessidade de uso de lubrificantes de qualidade superior nesses motores.

### 3.6 – MOTORES DOIS TEMPOS

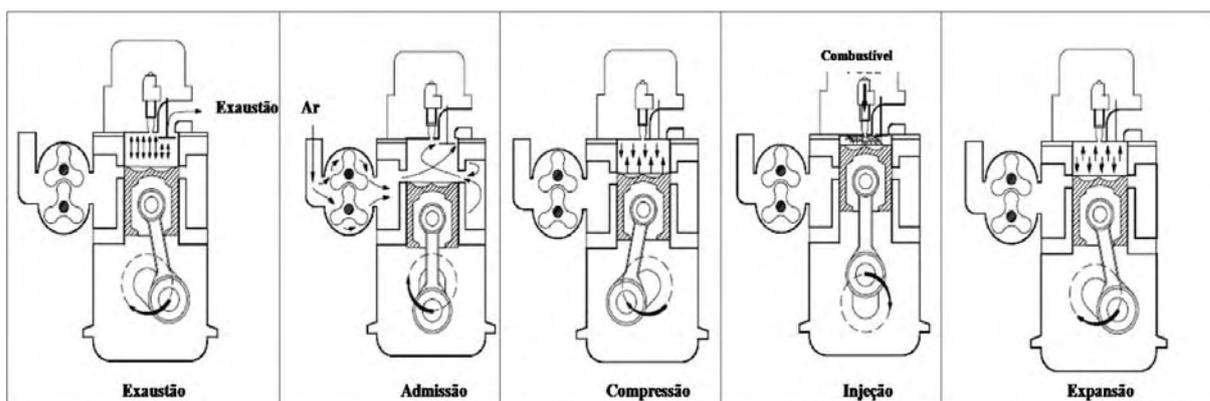
A característica que distingue o método de operação do motor de dois tempos é que, a cada curso de expansão corresponde um curso de trabalho. Tal operação é possível porque o bombeamento não é efetuado nos cilindros, mas em um mecanismo separado, chamado bomba de ar de lavagem, lembrando que, para cada potência, necessita-se de uma capacidade de ar definida e que o motor de dois tempos deve admitir em seus cilindros a mesma quantidade de ar por unidade de tempo comparando com o motor de quatro tempos com a mesma potência fornecida (TAYLOR, 1988).

Em um motor de dois tempos o ciclo completo de trabalho requer apenas dois cursos do pistão. Portanto, ele exige apenas uma rotação do virabrequim para completar um ciclo, sendo o eixo orientado de modo a girar na mesma velocidade que o virabrequim

O ciclo de trabalho é melhor entendido da seguinte forma:

- ✓ Quando o pistão está no PMS, o cilindro contém uma carga de ar altamente comprimida. O combustível diesel é pulverizado no cilindro pelo injetor e inflama-se imediatamente devido ao calor e à pressão dentro do cilindro;

- ✓ A pressão criada pela combustão do combustível desloca o pistão em movimento descendente;
  - ✓ Quando o pistão se aproxima do PMI (ponto morto inferior), todas as válvulas de escapamento se abrem. Os gases queimados são expelidos rapidamente do cilindro, aliviando a pressão;
  - ✓ Ao final do curso do pistão, as janelas de admissão de ar são descobertas. O ar pressurizado enche o cilindro, forçando para fora o restante dos gases queimados;
  - ✓ As válvulas de escapamento se fecham e o pistão começa um movimento ascendente, fechando as janelas de admissão e comprimindo a carga de ar fresco;
  - ✓ Quando o pistão se aproxima do PMS, têm-se início novamente o ciclo de trabalho.
- Na Figura 3.6 são descritos os processos envolvidos no ciclo de trabalho de um motor 2 tempos.



**Figura 3.6 – Processos do ciclo 2 tempos (adaptado de MECHANICAL SCIENCE, 1993).**

Uma vez que a mistura passa pelo cárter o mesmo tem que ser seco, isto é, não pode ter óleo e é por este motivo que nos motores a 2 tempos o lubrificante tem que ser diluído no combustível.

No ciclo Diesel dois tempos a queima do óleo Diesel se dá no momento em que é injetado em meio ao ar pressurizado, quando o pistão se encontra no ponto morto superior.

Neste tipo de motor cerca de 38 % da energia gerada é aproveitada em forma de trabalho, 30 % é dissipada para o sistema de arrefecimento e 32 % do calor é rejeitado para o escape do sistema (MECHANICAL SCIENCE, 1993).

A seguir são mencionadas algumas vantagens e desvantagens dos motores dois tempos:

**Vantagens:**

- ✓ O motor de dois tempos, com as mesmas dimensões e peso, proporciona maior potência que o motor de quatro tempos normalmente aspirado, além do torque ser mais uniforme.
- ✓ Não possuem em seu tipo construtivo válvulas de admissão e escape e comando de válvulas, o que influi em uma redução do seu peso e consequente facilidade de montagem.

**Desvantagens**

- ✓ Além das bombas especiais de exaustão e de carga, com menor poder calorífico e consumo de combustível relativamente elevado, apresenta carga calorífica consideravelmente mais elevada que num motor de quatro tempos de igual dimensionamento.
- ✓ Motores 2 tempos são muito poluentes, devido a queima do lubrificante juntamente com o combustível.
- ✓ Vida útil menor, quando comparado com motor de quatro tempos.

## 4 – LUBRIFICANTES E TÉCNICAS DE ANÁLISE DE ÓLEO LUBRIFICANTE

### 4.1 – LUBRIFICANTES

Quando ocorre um movimento relativo entre superfícies é normalmente desejável minimizar a fricção e o desgaste. Qualquer substância interposta que reduz a fricção e desgaste é um lubrificante (CUNHA, 2005).

A lubrificação pode ser feita de muitas formas diferentes, dependendo da geometria dos corpos em contato, da aspereza e textura das superfícies deslizantes, da carga, da pressão, da temperatura, das velocidades de rolamento e escorregamento, das condições ambientais, das propriedades físicas e químicas do lubrificante, da composição do material, e das propriedades das camadas superficiais das peças. Duas outras funções importantes dos lubrificantes são proteção contra corrosão e auxílio à vedação (CUNHA, 2005).

As funções básicas de um lubrificante em um motor consistem em:

- ✓ Redução do Atrito: A função primária do lubrificante é formar uma película delgada entre duas superfícies móveis, reduzindo o atrito e suas consequências, que podem levar à quebra dos componentes.
- ✓ Refrigeração: O óleo lubrificante representa um meio de transferência de calor. Nos motores de combustão interna, o calor é transferido para o óleo através de contatos com vários componentes, e então, para o sistema de arrefecimento de óleo.
- ✓ Limpeza: Em motores de combustão interna especialmente, uma das principais funções do lubrificante é retirar as partículas resultantes do processo de combustão e manter estas partículas em suspensão no óleo, evitando que se depositem no fundo do cárter e provoquem incrustações.
- ✓ Proteção contra a corrosão: A corrosão e o desgaste podem resultar na remoção de metais do motor, por isso a importância dos aditivos anticorrosivo e antidesgaste.
- ✓ Vedação da câmara de combustão: O lubrificante ao mesmo tempo em que lubrifica e refrigera, também age como agente de vedação, impedindo a saída de lubrificante e a entrada de contaminantes externos ao compartimento.

Dentre os vários tipos de lubrificantes será dada ênfase aos lubrificantes líquidos utilizados em motores a combustão interna de ciclo Diesel.

Uma maneira de caracterizar os lubrificantes líquidos é através de sua viscosidade e, no caso de lubrificantes para motores, caracterizam-se também pelo nível de aditivos utilizados para melhorar seu desempenho. Os lubrificantes são subdivididos de acordo com a sua base de formulação, ou seja, são definidos como (PETROBRAS, 1999).

- ✓ Minerais: São óleos obtidos a partir da destilação do petróleo. Suas propriedades dependem da natureza do óleo cru, cuja composição, muito variada, é formada por grande número de hidrocarbonetos, pertencentes a três classes: parafínicos, naftênicos e aromáticos. Os óleos minerais são os mais utilizados e importantes em lubrificação.
- ✓ Graxos: São óleos de origem vegetal ou animal. Foram os primeiros lubrificantes a serem utilizados, e satisfaziam as modestas necessidades da época em que predominava a tração animal. Atualmente são pouco recomendados, principalmente por não suportarem temperaturas elevadas, oxidando-se facilmente, tornando-se rançosos e formando ácidos.
- ✓ Aditivados: Os óleos aditivados são óleos minerais puros ou sintéticos, aos quais foram adicionadas substâncias comumente chamadas de aditivos, com o fim de reforçar ou acrescentar determinadas propriedades.
- ✓ Compostos: São misturas de óleos minerais e graxos. Certas aplicações especiais requerem muitas vezes o uso de óleos compostos, que conferem ao produto obtido maior oleosidade e maior facilidade de emulsão na presença de vapor. Geralmente são utilizados em equipamentos como perfuratrizes e cilindros a vapor.
- ✓ Sintéticos: São lubrificantes desenvolvidos em laboratório por processo de polimerização, especialmente para oferecer características especiais de viscosidade e resistência a temperaturas elevadas ou muito baixas, de forma a atender aplicações especiais em algumas indústrias. Esses lubrificantes são de custo elevado, devendo, portanto, serem empregados apenas em casos específicos que não possam ser atendidos pelos lubrificantes minerais.

#### **4.1.1 – Propriedades fundamentais do óleo lubrificante**

Podem ser destacadas algumas propriedades e características de um óleo lubrificante que interferem diretamente no seu desempenho e na sua qualidade de lubrificação no interior de um motor, tais como:

- ✓ Viscosidade;
- ✓ Índice de viscosidade;
- ✓ Densidade;
- ✓ Ponto de fulgor;
- ✓ Ponto de fluidez;
- ✓ TAN/TBN.

#### 4.1.2 – Classificações

A classificação de óleos lubrificantes surgiu de uma necessidade que os engenheiros das fábricas de automóveis e os petroleiros tinham em padronizar seus produtos para serem melhores identificados pelo consumidor. As siglas que formam essa classificação atualmente são baseadas em normas de acordo com seu uso, qualidade e destinação. O produto é classificado após testes específicos que determinam as funções, composições, características físicas, entre outros requisitos. Atualmente existem diversos órgãos reguladores que classificam óleos lubrificantes, dentre eles:

**SAE - *Society of Automotive Engineers*:** É a classificação mais antiga para lubrificantes automotivos para motor e transmissão, definindo faixas de viscosidade e não levando em conta os requisitos de desempenho. Sua criação começou no início de 1900 quando os grandes produtores de carros começaram a surgir nos EUA e Europa e foi oficializada em 1905, tendo como 1º presidente Andrew Riker e como o 1º Vice – Presidente, Henry Ford, quem se tornaria mais tarde um marco na história.

**API - *American Petroleum Institute*:** Seu começo pode ser rastreado a partir da 1ª Guerra Mundial, quando o Congresso e indústrias de petróleo e gás natural americanas trabalharam juntas para se fortalecerem. A API foi oficialmente estabelecida em 20 de março de 1919 e elaborou, em conjunto com a ASTM (*American Society for Testing and Materials*), especificações que definem níveis de desempenho que os óleos lubrificantes devem atender.

**ACEA - *Association des Constructeurs Européens de l'Automobile*:** Associa alguns testes da classificação API, ensaios de motores europeus (Volkswagen, Peugeot, Mercedes Benz, etc.) e ensaios de laboratório.

**JASO - *Japanese Automobile Standards Organization*:** Define especificação para a classificação de lubrificantes para motores dois tempos (FA, FB e FC, em ordem crescente de desempenho).

**NMMA - *National Marine Manufacturers Association*:** Substituiu a antiga BIA (*Boating Industry Association*), classificando os óleos lubrificantes que satisfazem suas exigências com a sigla TC-W (*Two Cycle Water*), aplicável somente a motores de popa de dois tempos. Atualmente encontram-se óleos nível TC-W3, pois os níveis anteriores estão em desuso.

Vale destacar que as normas mais utilizadas no Brasil são: a API, para desempenho, e a SAE, para viscosidade. A API regulariza todos os produtos derivados de petróleo e gás natural, porém este trabalho focará somente os óleos lubrificantes utilizados em motores a Diesel.

#### **4.1.2.1 – Classificação API**

O sistema de classificação de óleos da API (*American Petroleum Institute*) permite que os óleos sejam definidos com base na suas características de desempenho e no tipo de serviço ao qual se destinam. Este sistema permite o acréscimo de novas categorias a medida que os projetos dos motores mudam e se exige mais do óleo do motor.

A API classifica os óleos utilizados em motores de ignição por compressão com a sigla C (de compressão) e uma segunda letra em ordem crescente que determina o avanço tecnológico do óleo, sendo assim um óleo API de classificação CC oferece menos proteção ao motor do que um de classificação API CF (LUBRIFICANTES, 2007).

A Tabela 4.1 descreve os níveis de classificação API para motores, determinando o lubrificante de acordo com as atividades desenvolvidas por cada tipo de motor. No Brasil, lubrificantes com classificação API A, B, C, D e E, não são mais comercializados, pois os níveis de aditivação presentes em lubrificantes de classificação superior atendem perfeitamente os motores enquadrados para tais classificações.

Tabela 4.1 – Tabela de classificação API para Motores de Ciclo Diesel (LUBRIFICANTES, 2007).

CLASSIFICAÇÃO API	DESCRIÇÃO
CI – 4	Motores Diesel equipados com EGR ( <i>Exhaust Gás Recirculation</i> ) - serviço severo. O número 4 indica que o óleo é adequado para motores quatro tempos
CG – 4	Motores de alta rotação – serviço severo
CF – 2	Motores Diesel 2 tempos
CF	Serviço pesado. Combustível com alto teor de enxofre
CE	Motores Diesel turbinados
CD – 2	Motores Diesel 2 tempos – serviço severo
CD	Serviço pesado
CC	Serviço moderado e severo com aspiração natural
CB	Serviço moderado
CA	Serviço leve

Na Tabela 4.1, tem-se:

**CA** – Óleo com aditivos que promovem uma proteção aos mancais, contra a corrosão, desgaste, evitando a formação de depósitos de altas temperaturas. Satisfaz a especificação militar MIL-L-2104-A. Óleo para uso em motores Diesel não turbinados (com aspiração normal no ar), operando em condições suaves ou moderadas, com combustível de baixo teor de enxofre (0,4 %). Este tipo de óleo foi largamente usado nas décadas de 1940 e 1950.

**CB** – Óleo com aditivos, proporcionando a mesma proteção que os óleos de Classe CA, mas em maior grau, devido à utilização de um combustível de elevado teor de enxofre. Satisfaz a especificação MIL-L-2104-A, suplemento 1. Óleo para uso em motores Diesel, operando em condições suaves ou moderadas, com combustível de elevado teor de enxofre (1%).

**CC** – Os óleos da classe CC proporcionam proteção contra depósitos de altas temperaturas e formação de borra de baixa temperatura. Também possuem proteção contra ferrugem, desgaste e corrosão. Satisfaz a especificação MIL-L-2104-B. Óleo para uso em motores Diesel turbinados com baixa taxa de superalimentação, operando sob condições de moderadas a severas, com qualquer tipo de combustível.

**CD** – Óleo com aditivos, proporcionando a mesma proteção que os óleos classe

CC, mais em maior grau. Indicado para motores Diesel turbinados com alta taxa de superalimentação, operando em condições severas e com qualquer tipo de combustível. Satisfaz a especificação MIL-L-2104-C e a especificação da Caterpillar, Série 3.

**CD-2** – Motores Diesel 2 tempos, trabalhando em serviço severo. Atende os requisitos dos motores Detroit como, por exemplo, os da série 149 dos caminhões fora de estrada Haulpak.

**CE** – Óleo com aditivos, superando a categoria CD em ensaios mais severos de desempenho. Satisfaz as exigências dos fabricantes americanos quanto ao consumo de óleo lubrificante, combustível, controle de depósitos, dispersância, desgaste e corrosão. Homologada em abril de 1987. Indicado para motores Diesel turboalimentados em serviço severo.

**CF** – Categoria introduzida a partir de 1994, podendo ser usada em substituição a API CE. Para serviços em motores Diesel de injeção indireta e outros, incluindo os que usam Diesel com alto teor de enxofre (acima de 0,5%). Apresenta efetivo controle dos depósitos nos pistões, corrosão em mancais e desgaste, sendo os motores superalimentados, turbinados ou de aspiração natural. Atende aos testes de motor CRCL-38 e Caterpillar IMPC.

**CF-2** – Para serviço em motores Diesel de 2 tempos que requerem efetivo controle de desgaste e depósitos. Esta categoria demonstra superior desempenho em relação aos óleos da classificação CD-2, podendo substituí-la. Atende aos testes de motor CRL L-38, Caterpillar IM- PC e Detroit Diesel 6 V92TA.

**CF-4** – Esta classificação foi criada em 1990 para uso em motores Diesel quatro tempos operando em altas velocidades. O CF-4 excede os requisitos do API CE no que tange a um maior controle de consumo de lubrificante e depósitos nos pistões. Atende os requisitos da CRC L-38, MACK-T6, MACK-T7, CUMMINS NTC 400 e Caterpillar 1K.

**CG-4** – Categoria introduzida em 1994, desenvolvida especialmente para uso em motores projetados para atender aos níveis de emissão do EPA (*Environmental Protection Agency*) podendo ser usada nos motores Diesel de alta rotação em uso rodoviário, usando óleo Diesel com teor de enxofre inferior a 0,5 %. Os óleos desta categoria destacam-se pela proteção aos motores contra depósitos em pistões operando em altas temperaturas, espuma, corrosão, desgaste, estabilidade a oxidação e acúmulo de fuligem. Atende aos testes de motor: CRC L-38, sequência IIIE, GM 6.2L, MACK T-8 e Caterpillar 1K.

**CH-4** – Categoria disponível a partir de dezembro de 1998. A classificação API CH-4 foi desenvolvida para atender à rigorosos níveis de emissão de poluentes, em motores de alta rotação e esforço, que utilizam óleo Diesel com até 0,5 % de enxofre. Os óleos desta categoria proporcionam especial proteção contra desgaste nos cilindros e anéis de vedação, além de possuírem o adequado controle de volatilidade, oxidação, corrosão. A classificação CH-4 substitui as classificações anteriores para motores de quatro tempos a Diesel.

#### 4.1.2.2 – Classificação SAE

A classificação SAE (*Society of Automotive Engineers*) não considera o desempenho do produto, mas apenas a sua viscosidade. A viscosidade de um óleo é a medida da sua resistência ao escoamento e varia conforme a temperatura.

A SAE desenvolveu um sistema de classificação baseado nas medições de viscosidade. Para óleos de motores, este sistema estabeleceu 11 tipos de classificações ou graus de viscosidade: SAE 0W, 5W, 10W, 15W, 20W, 25W, 20, 30, 40, 50 e 60. O "W" que se segue ao grau de viscosidade SAE significa inverno (*winter*) e indica que um óleo é adequado para uso em temperaturas mais frias. Os óleos que tem a designação W devem ter o valor de viscosidade adequado quando medida nas temperaturas baixas. As classificações SAE que não incluem o W definem graduações de óleo para uso em temperaturas mais altas. A viscosidade desses óleos SAE 20, 30, 40 e 50 devem ter o valor adequado quando medida a 100° C.

O desenvolvimento dos melhoradores de índice de viscosidade possibilitou a fabricação dos óleos de múltipla graduação e de boa qualidade, este tipo é também conhecido como óleo multiviscoso. Esses óleos, SAE 20W40, 20W50, 5W40, por exemplo, são largamente usados, porque ao dar partida no motor o óleo está frio. Nesta temperatura ele deve ser "fino" o suficiente para fluir bem e alcançar todas as partes do motor. Já em altas temperaturas, ele deve ter a viscosidade adequada para manter a película protetora entre as partes metálicas, garantindo a lubrificação adequada a temperatura de trabalho do motor.

Os óleos multigrados podem ser usados em uma gama maior de temperaturas do que os óleos monoviscoso. Suas características de temperatura/viscosidade proporcionam

partida e bombeio fáceis em baixas temperaturas, todavia, eles são viscosos o bastante em altas temperaturas.

Quanto menor for o índice W, mais rápido o óleo fluirá no momento mais crítico, que é o da partida, evitando o contato entre as partes metálicas e minimizando o desgaste. O número sem o W refere-se à viscosidade do óleo na temperatura de operação do motor. Assim, um óleo 5W40 terá o mesmo comportamento de viscosidade a quente, que um óleo 15W40 já que ambos serão SAE 40. Sua viscosidade na partida a frio, entretanto, será menor, permitindo que o lubrificante atinja a parte alta do motor mais rapidamente.

A Tabela 4.2 demonstra os valores de viscosidades dos óleos lubrificantes monograus e multigraus.

**Tabela 4.2 - Tabela de classificação SAE J300 <sup>(1)</sup> (TEXACO, 2005)**

Grau de Viscosidade SAE	Viscosidade (cP)		Viscosidade (cSt) a 100 °C <sup>(4)</sup>		Viscosidade (cSt) após cisalhamento <sup>(5)</sup>
	A temp. °C máxima		Mín	Máx	
	Partida <sup>(2)</sup>	Bombeamento <sup>(3)</sup>			
<b>0 W</b>	6.200 até -35 °C	60.000 até -40 °C	3,8	-	
<b>5 W</b>	6.600 até -30 °C	60.000 até -35 °C	3,8	-	
<b>10 W</b>	7.000 até -25 °C	60.000 até -30 °C	4,1	-	
<b>15 W</b>	7.000 até -20 °C	60.000 até -25 °C	5,6	-	
<b>20 W</b>	9.500 até -15 °C	60.000 até -20 °C	5,6	-	
<b>25 W</b>	13.000 até -10 °C	60.000 até -15 °C	9,3	-	
<b>20</b>	-	-	5,6	<9,3	2,6
<b>30</b>	-	-	9,3	<12,5	2,9
<b>40</b>	-	-	12,5	<16,3	2,9 <sup>(6)</sup>
<b>40</b>	-	-	12,5	<16,3	3,7 <sup>(7)</sup>
<b>50</b>	-	-	16,3	<21,9	3,7
<b>60</b>	-	-	21,9	<26,1	3,7

Notas:

- 1) Valores com especificações definidas pela ASTM D-3244
- 2) Viscosidade aparente utilizando o Simulador de partida a frio (CCS) - Método ASTM D 5293.
- 3) Viscosidade aparente utilizando o Viscosímetro rotativo (MRV) - Método ASTM D 4684.
- 4) Viscosidade cinemática utilizando Viscosímetro capilar - Método ASTM D 445.
- 5) Viscosidade após cisalhamento de 10<sup>-6</sup>s, e temperatura de 150°C utilizando o Viscosímetro simulador de rolamento selado - Método ASTM D 4683.
- 6) Para óleos SAE 0W40, 5W40 e 10W40.
- 7) Para óleos SAE 15W40, 20W40, 25W40 e 40.

### 4.1.3 – Aditivos

Os aditivos são produtos químicos que são incorporados aos óleos básicos, reforçando ou acrescentando novas características exigidas. Os principais aditivos são:

- ✓ Detergentes;
- ✓ Dispersantes;
- ✓ Detergentes alcalinos;
- ✓ Antioxidantes;
- ✓ Passivadores de metais;
- ✓ Anticorrosivos;
- ✓ Antiferrugem;
- ✓ Antiespumantes;
- ✓ Antidesgaste;
- ✓ Extrema pressão;
- ✓ Modificadores de atrito ou fricção;
- ✓ Agentes de adesividade;
- ✓ Abaixadores do ponto de fluidez;
- ✓ Melhoradores de índice de viscosidade;
- ✓ Corantes.

Os aditivos, na sua maioria, são misturados aos óleos bases através de pacotes, ou seja, uma mistura já preparada que irá trazer os benefícios assegurados pelo lubrificante. Cada aditivo listado traz isoladamente um benefício, como, por exemplo:

- ✓ O aditivo detergente, com menor poder dispersante, possuem cinzas devido a presença de metais em sua composição. São capazes de manter em suspensão as partículas de vários tamanhos.
- ✓ Os aditivos detergentes alcalinos são usados para neutralização dos ácidos gerados pela combustão, reduzindo a formação dos depósitos carbonosos, lacas e vernizes.
- ✓ Os aditivos modificadores de fricção reduzem o coeficiente de atrito entre as partes em movimento, reduzindo assim o desgaste.

Um dos principais aditivos são os melhoradores do Índice de Viscosidade (IV). São responsáveis pela redução da variação da viscosidade em função da temperatura. São compostos por polímeros de elevado peso molecular, que formam uma espécie de nódulos no óleo. A medida que a temperatura do lubrificante se eleva os nódulos se expandem, e,

assim dificultam o escoamento do óleo. Este aditivo é importante nas partidas a frio, pois mantém as suas viscosidades adequadas quando os “nódulos” estão contraídos nos seus invólucros.

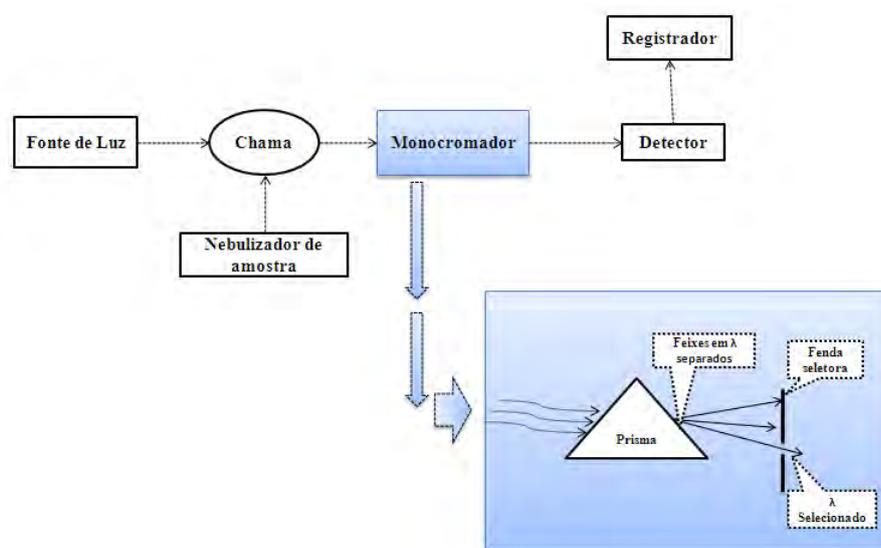
## 4.2 – TÉCNICAS DE ANÁLISE DE LUBRIFICANTES USADOS

### 4.2.1 – Espectrometria

Tendo em vista a gama de materiais que compõem um equipamento, a espectrometria surge com uma das técnicas que auxiliam no monitoramento das partículas presentes no lubrificante, é uma ferramenta que proporciona o melhor momento para a manutenção do equipamento.

Os Programas de Análise de Óleo por Espectrografia (*Spectrometric Oil Analysis Program – SOAP*) começaram a ser utilizados nos anos 40 pela indústria da estrada de ferro para teste de desgaste a partir de amostras de lubrificante. Com o advento do espectrômetro de emissão atômica os métodos SOAP passaram a ser utilizados em aviões militares e alguns veículos militares com motores a diesel. Os métodos incluem a absorção atômica (AA), espectrografia de emissão atômica (AES), plasma induzido por emissão (ICPE), Raio X por fluorescência (XRF). Destes métodos, AES e ICPE, se baseiam na detecção da luz emitida pelos elementos, são os mais populares por causa do custo, da velocidade e de outros fatores. (LOCKWOOD; DALLEY, 1992).

A Figura 4.1 demonstra o princípio de funcionamento de um espectrômetro.



**Figura 4.1 – Esquema de funcionamento de um espectrógrafo (Adaptado de SILVA JÚNIOR; CASELLA; BIDART, 2006).**

A maioria dos equipamentos modernos de espectrometria atômica são capazes de medir tanto a radiação absorvida por uma espécie atômica quanto a sua emissão. Desta forma é muito importante para o operador compreender os processos que ocorrem em cada uma das técnicas.

Cada elemento tem um número específico de elétrons associados com seu núcleo. A configuração mais estável de um átomo é denominada “estado fundamental” e representa a forma como este é comumente encontrado no estado gasoso.

Se uma determinada quantidade de energia é aplicada sobre o átomo e esta é absorvida, um dos elétrons mais externos será promovido a um nível energético superior, levando o átomo a uma configuração energética menos estável denominada “estado excitado”. Uma vez que esta configuração é instável, o átomo retorna imediatamente para o “estado fundamental”, liberando a energia absorvida sob a forma de luz.

Esses dois processos (absorção e emissão de luz) são explorados, com fins analíticos, através das técnicas de Emissão Atômica e Absorção Atômica.

#### 4.2.1.1 – Emissão Atômica

Na técnica de emissão atômica, estão envolvidos os processos de excitação (absorção de energia) e decaimento (liberação de energia), mostrados na Figura 4.2.



Figura 4.2 – Representação do processo da espectrografia por emissão atômica (SILVA JÚNIOR; CASELLA; BIDART, 2006)

Na técnica de emissão o átomo é colocado em um ambiente com alta disponibilidade de energia a fim de serem produzidos átomos no “estado excitado”. Este ambiente pode ser obtido por meio de chama, em forno de grafite, ou, mais recentemente, através de um plasma.

O espectro de emissão de uma espécie atômica consiste na coleção de comprimentos de onda de emissão denominadas linhas de emissão, por causa de sua natureza discreta. A intensidade de uma linha de emissão aumenta na medida em que

aumenta a proporção de átomos excitados para aquele estado específico de um dado elemento, em relação à população total dos átomos daquele elemento.

#### 4.2.1.2 – Absorção Atômica

O processo de absorção atômica pode ser representado pela Figura 4.3.



Figura 4.3 – Representação do processo de espectrografia por absorção atômica (SILVA JÚNIOR et al, 2006).

Nas fontes de luz para absorção atômica (lâmpadas de cátodo oco), o estado excitado é obtido por colisão do átomo com partículas aceleradas (elétrons ou íons). Os átomos excitados, sendo instáveis, retornam espontaneamente para o “estado fundamental”, emitindo luz.

Átomos no “estado fundamental” são capazes de absorver energia luminosa de um comprimento de onda específico, alcançando um “estado excitado”. Aumentando-se o número de átomos presentes no caminho ótico pode-se aumentar a quantidade de radiação absorvida.

Medindo-se a variação da quantidade de luz transmitida, pode-se realizar uma determinação quantitativa do analito presente. Na técnica de absorção atômica, fontes especiais de luz conjugadas com sistemas eficientes de seleção de comprimentos de onda permitem a determinação específica de elementos.

#### 4.2.1.3 – Emissão Atômica versus Absorção Atômica

Existem algumas diferenças básicas entre as técnicas de emissão e absorção atômica.

Na técnica de emissão, a chama basicamente possui dois propósitos:

- ✓ Converter o aerossol da amostra em um vapor atômico (onde se encontram átomos no “estado fundamental”).
- ✓ Excita, termicamente, estes átomos, levando-os ao “estado excitado”. Quando estes átomos retornam ao estado fundamental, eles emitem a luz

que é detectada pelo instrumento. A intensidade de luz emitida está relacionada com a concentração do elemento de interesse na solução.

Na absorção atômica, a única função da chama é converter o aerosol da amostra em vapor atômico, que pode então absorver a luz proveniente de uma fonte primária. A quantidade de radiação absorvida está relacionada com a concentração do elemento de interesse na solução.

Observando a Tabela 4.3, é possível comparar a espectrografia por emissão atômica e a espectrografia por absorção atômica.

**Tabela 4.3 – Comparativo absorção atômica e emissão atômica (ROYLANCE; HUNT, 1999)**

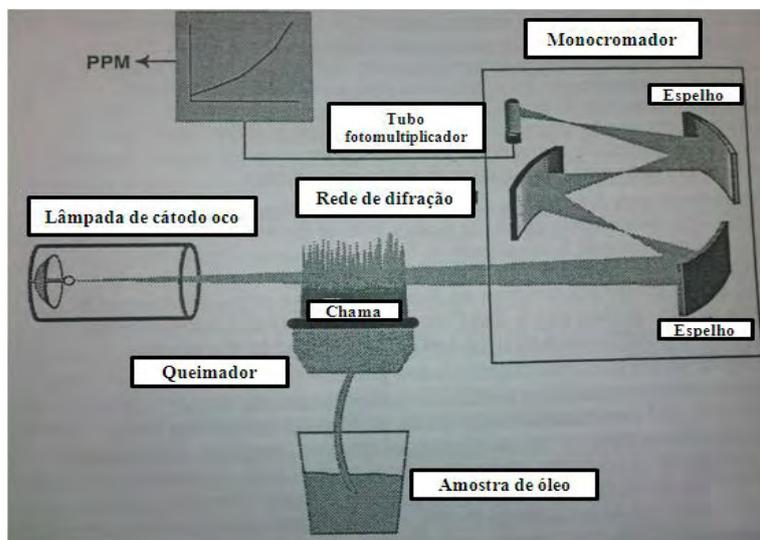
<b>Instrumento</b>	<b>Processo</b>	<b>Tamanho da partícula</b>	<b>Perdas no processo</b>	<b>Comentários</b>
<b>Absorção atômica</b>	Óleo diluído na forma de <i>spray</i> em ambiente aquecido. Átomos dos elementos excitados absorvem luz. Análise por monocromatógrafo	Até 1 $\mu\text{m}$	Partículas queimadas	Ampla gama de elementos em ppm, 30 segundos para término da análise.
<b>Emissão atômica</b>	Luz é gerada quando os átomos retornam do estado estável depois de serem excitados	Até 5 $\mu\text{m}$	Partículas queimadas	Processo lento, somente alguns elementos são testados por esse método.

#### **4.2.1.4 – Instrumentação necessária para absorção atômica**

Como visto, os instrumentos empregados na técnica de Absorção Atômica possuem cinco componentes básicos:

- 1 - A fonte de luz, que emite o espectro do elemento de interesse;
- 2 - A “célula de absorção”, na qual os átomos da amostra são produzidos;
- 3 - O monocromador, para a dispersão da luz e seleção do comprimento de onda a ser utilizado;
- 4 - O detector, que mede a intensidade de luz, transforma este sinal luminoso em um sinal elétrico e o amplifica;

5 - Um *display* que registra e mostra a leitura depois do sinal ser processado.  
Um diagrama esquemático do equipamento é descrito na Figura 4.4.



**Figura 4.4 – Diagrama esquemático do equipamento de espectrografia por absorção atômica de feixe simples (TOMS, 1998).**

A fonte de luz (lâmpada de cátodo oco ou lâmpada de descarga sem eletrodos) emite o espectro específico do elemento da qual é feita, que é focalizado através da célula e do monocromador.

A fonte de luz deve ser modulada (eletronicamente ou mecanicamente) para diferenciar a luz proveniente da própria fonte daquela proveniente da emissão da chama. O monocromador separa a luz em seus diferentes comprimentos de onda, isolando um comprimento de onda específico para alcançar o detector que, na maioria das vezes, é uma fotomultiplicadora. Esse comprimento de onda produz no detector uma corrente elétrica que é proporcional a intensidade de luz.

A Tabela 4.4 apresenta os elementos químicos que a espectrografia por absorção atômica é capaz de detectar no óleo.

**Tabela 4.4 – Elementos detectados na espectrografia por absorção atômica, juntamente com suas origens (ROYLANCE; HUNT, 1999).**

<b>Elemento</b>	<b>Origem</b>
<b>Alumínio</b>	Espaçadores, calços, arruelas, mancais, pistões de motores alternativos.
<b>Antimônio</b>	Ligas próprias e graxas para mancais
<b>Bário, Magnésio</b>	Aditivos para lubrificante, graxas
<b>Boro</b>	Vedação hidráulica, refrigerantes
<b>Cálcio</b>	Aditivos para lubrificante, graxas e alguns mancais
<b>Cromo</b>	Anel e camisa do pistão
<b>Cobre</b>	Metal dos rolamentos anti fricção, buchas
<b>Ferro</b>	Engrenagens, rolamentos, parede dos cilindros, guias das válvulas, balancim, anéis dos pistões, mancais de esferas e de rolos, pistas dos mancais, pinos e porcas de travamentos.
<b>Manganês</b>	Válvulas, bombas, sistemas de exaustão
<b>Molibdênio</b>	Anéis de pistão (somente motores Diesel), motores elétricos e aditivos para lubrificante.
<b>Níquel</b>	Pás de turbinas, guias metálicas de válvulas, metais de rolamentos.
<b>Silício</b>	Poeira, aditivos antiespumantes.

#### **4.2.2 – Ferrografia**

O termo ferrografia foi introduzido na década de 1970 pelos inventores Seiffert e Westcott que necessitavam na época de uma melhoria da análise de óleo lubrificante dos motores aeronavais. Até então, usava-se o método usual de quantificar a concentração de material particulado, no qual as partículas eram depositadas em filtro de papel e observadas em microscópio. Assim, tornava-se difícil observar a morfologia e as dimensões das partículas.

A ferrografia é uma técnica de monitoramento e diagnose que auxilia na determinação da severidade, modos e tipos de desgastes em máquinas, que influenciam na tomada de decisões quanto ao tipo e a urgência de intervenção da manutenção.

Esta técnica baseia-se sob algumas premissas, as quais podem ser destacadas:

- ✓ Toda máquina desgasta-se antes de falhar;
- ✓ O desgaste gera partículas;

- ✓ A quantidade e o tamanho das partículas são diretamente proporcionais à severidade do desgaste que pode ser constatado mesmo a olho nu;
- ✓ Os componentes de máquinas que sofrem atrito, geralmente são lubrificados e as partículas permanecem em suspensão durante certo tempo;
- ✓ Considerando que as máquinas e seus elementos são constituídos basicamente de ligas de ferro, a maior parte das partículas provém dessas ligas.

A Figura 4.5 demonstra o esquema de um ferrografo, equipamento desenvolvido na época por Westcott que separava as partículas presentes no óleo de acordo com o seu tamanho.

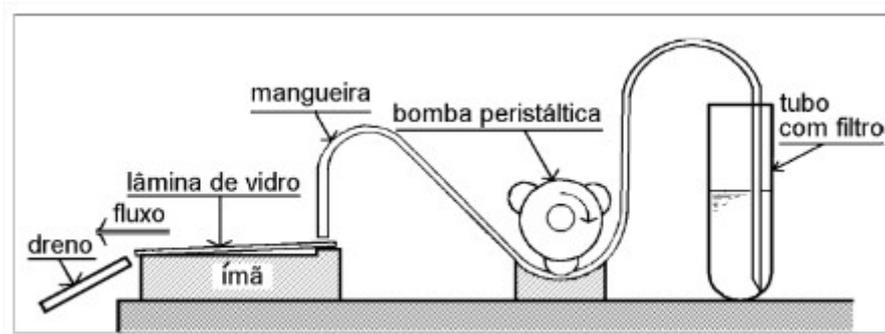


Figura 4.5 – Esquema de ferrógrafo  
(2009, < <http://www.essel.com.br/cursos/material/01/Manutencao/33manu2.pdf>>).

Existem dois tipos de análise ferrográfica, uma quantitativa que consiste em avaliar as condições de desgaste dos componentes de uma máquina ou equipamento por meio da quantificação das partículas em suspensão no óleo, e outra do tipo analítica, que observa a morfologia das partículas no lubrificante.

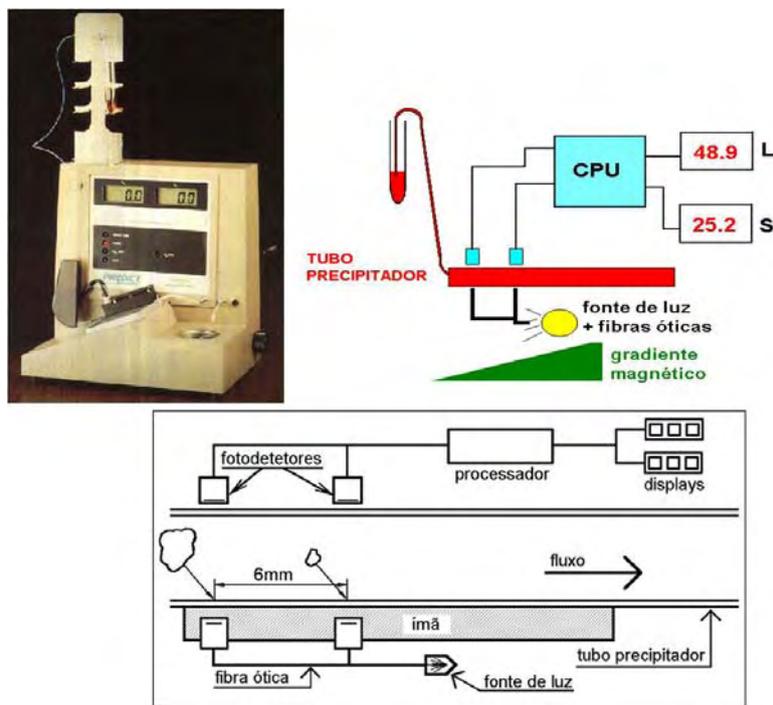
#### 4.2.2.1 – Ferrografia Direta

O método de ferrografia direta ou quantitativa proporciona de maneira rápida e prática uma classificação das partículas contidas no óleo lubrificante. Tal classificação é nomeada leitura direta, na qual os elementos encontrados na amostra são distinguidos entre partículas grandes e pequenas. Tal classificação é nomeada da seguinte forma:

L - (abreviatura de *large* = grande) corresponde ao valor encontrado de maiores que 5  $\mu\text{m}$ ).

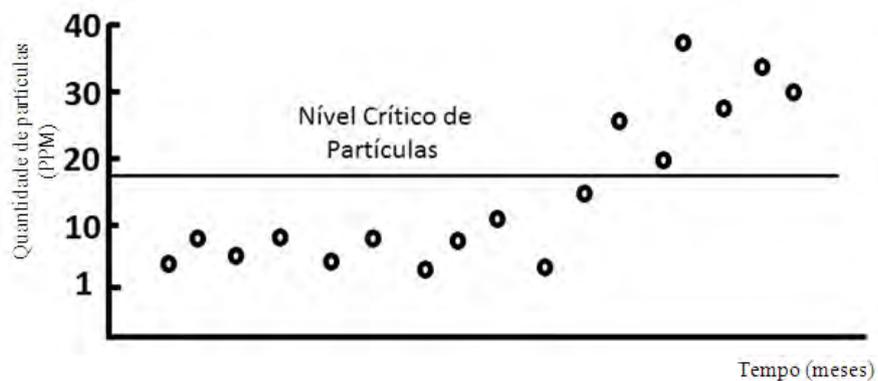
S - (abreviatura de *small* = pequeno) corresponde ao valor encontrado de partículas pequenas (< 5  $\mu\text{m}$ ).

A Figura 4.6 ilustra o equipamento de ferrografia de leitura direta, seguido de seu esquema básico de funcionamento.



**Figura 4.6 – Equipamento e esquema de funcionamento do método de ferrografia direta.**

O uso da ferrografia quantitativa para o acompanhamento das condições do equipamento auxilia na construção de gráficos de tendências, na qual estatisticamente podem-se estabelecer parâmetros para avaliar as reais condições de desgaste da máquina. O gráfico de tendências é uma ferramenta utilizada para avaliar esses dados. A Figura 4.7 exemplifica o caso.



**Figura 4.7 – Modelo de gráfico de tendências (TOMS, 1998).**

A Figura 4.8 conhecida como “curva da asa” é comumente usada para avaliar os parâmetros de desgaste de uma máquina, onde no eixo Y encontram-se os níveis de concentração de partículas e no eixo X o tempo em intervalos de meses.

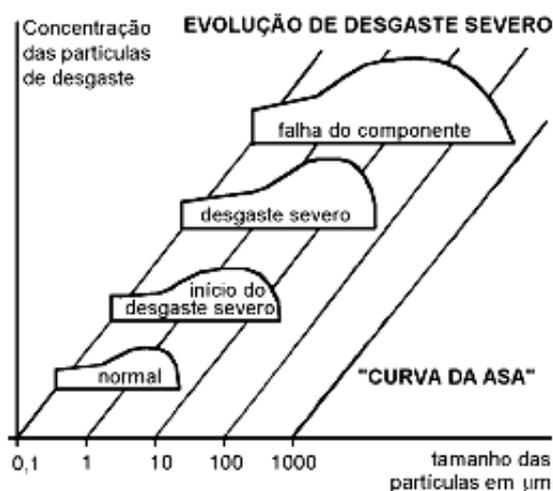


Figura 4.8 – Gráfico do tipo "curva da asa" (CUNHA, 2005).

#### 4.2.2.2 – Ferrografia Analítica

A técnica de ferrografia analítica tem por objetivo observar a morfologia, tamanho, cor e analisar visualmente a concentração de partículas no ferrograma.

Enquanto a ferrografia quantitativa indica uma tendência anormal de desgaste, as técnicas ferrográficas analíticas podem ser utilizadas para identificar especificamente a natureza dos problemas potenciais da máquina, permitindo um estudo profundo das partículas cujo tamanho esteja entre 1 e 250  $\mu\text{m}$  (ARATO, 2004).

A ferrografia analítica caracteriza os tipos de partículas de desgaste em cinco grupos, a seguir, são demonstrados os grupos juntamente com suas causas mais prováveis para o seu surgimento:

- ✓ Partículas ferrosas: Esfoliação, corte por abrasão, fadiga de rolamento, arrastamento e desgaste severo por deslizamento;
- ✓ Partículas não-ferrosas: Metais brancos, ligas de cobre, ligas de metal patente ou antifricção;
- ✓ Óxidos de ferro: Óxidos vermelhos, óxidos escuros, metais oxidados escuros;
- ✓ Produtos da degradação do lubrificante: Corrosão e polímeros de fricção;

- ✓ Contaminantes: Poeira, pó de carvão, asbesto, material de filtro, flocos de carbono.

O conhecimento da morfologia e o tipo de desgaste que a originou é muito importante para uma análise consistente da amostra, a seguir, são discutidos os diferentes tipos de partículas de desgaste.

### **Desgaste devido ao atrito**

Estas partículas são formadas pelo deslizamento normal entre duas superfícies metálicas.

As partículas são identificadas por sua forma de plaquetas planas e lisas, e por seu comprimento relativamente grande em relação a sua espessura. O tamanho da partícula é geralmente pequeno, menor que 15  $\mu\text{m}$  na dimensão principal. O desgaste que produz este tipo de partícula é de natureza benigna, e é frequentemente chamado de desgaste normal por atrito.

A contaminação de um sistema de lubrificação pode frequentemente acontecer e ter uma notável influência na produção de partículas de desgaste por atrito. A taxa de geração das partículas e, por sua vez, sua concentração, aumentam rapidamente, o que é frequentemente acompanhado por um aumento correspondente no tamanho das partículas, (algumas vezes maiores que 100  $\mu\text{m}$ ). Embora a falha catastrófica seja improvável sob estas condições, uma alta taxa de desgaste causa um rápido desgaste do maquinário e muito cuidado deve ser tomado na avaliação do estado de uso.

### **Desgaste severo por deslizamento**

Partículas de desgaste devido ao deslizamento severo podem ser formadas sob condições de carregamento excessivas na superfície, alta velocidade de funcionamento ou por lubrificação imprópria. As partículas são normalmente finas, enquanto que seu tamanho na dimensão principal é maior quando comparado com as partículas de desgaste normal por atrito, alcançando aproximadamente 20  $\mu\text{m}$ . Uma forma de caracterizar sua morfologia esta na presença de “estrias”, que são linhas paralelas na superfície resultante do deslizamento, outra característica deste tipo de desgaste em aço é a existência da coloração azulada, marrom ou amarela. As cores são resultado do aquecimento localizado, produzindo as cores do revenido associado com o aço. A severidade do desgaste esta relacionada com a temperatura atingida, partindo do amarelo claro para o azul, o que indica um nível de desgaste crítico.

São exemplos de materiais abrasivos: diamante, alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), zircônia ( $\text{ZrO}_2$ ), Sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e vidro (silicato). São exemplos de materiais resistentes a abrasão: Ferro fundido branco com alto teor de cromo, aço ferramenta, aço cementado e aço normalizado.

A usinagem, retificação, lapidação e esmerilhamento, podem ser citados como exemplos de processos de desgaste abrasivo de dois corpos. Já os de três corpos são: polimento e a decapagem em tambor rotativo.

### **Desgaste devido ao corte**

Neste tipo de desgaste, as partículas encontradas são indicativas de um estado de uso ativo, são produzidas por penetração, ranhura ou corte de uma superfície por outra. Isto é provocado pela diferença intrínseca no nível de dureza entre as superfícies em contato, ou pôr contaminantes duros embutidos na superfície de menor dureza, que causaram penetração na superfície oposta.

As partículas produzidas por este mecanismo são rapidamente identificadas por sua grande semelhança com cavaco ou detritos de usinagem, embora, suas dimensões sejam muito pequenas.

Estas partículas podem variar amplamente no comprimento, ou seja, de aproximadamente 5  $\mu\text{m}$  até 100  $\mu\text{m}$ , com larguras médias de 2 a 15  $\mu\text{m}$ . Frequentemente exibem cores do revenido resultante do aquecimento durante sua formação.

A presença de partículas de desgaste devido ao corte é indicativo de uma situação anormal de funcionamento e requer um monitoramento cuidadoso. Frequentemente algumas pequenas partículas de desgaste devido ao corte são encontradas fortuitamente dispersadas entre detritos depositados, porém não indicam nenhum uso adverso ocorrido. Porém, se a quantidade e/ou tamanho das partículas aumentarem com o tempo de trabalho, os indicativos apontam para uma iminente quebra de algum componente da máquina.

### **Desgaste devido a fadiga**

Quando as superfícies estão em contato devido a ação de uma carga de compressão, estas apresentam o movimento de rolamento, surgindo as tensões de contato, as quais produzem tensões de cisalhamento cujo valor máximo ocorre próximo a superfície de contato, tem-se a fadiga superficial.

Na zona de contato, a tensão normal de compressão é máxima na superfície e a de cisalhamento é máxima abaixo da superfície. Acredita-se, que devido as tensões cíclicas, esta tensão de cisalhamento pode levar a uma falha por fadiga do material. Esta teoria é

reforçada pela probabilidade de existir (ou se formar) uma trinca abaixo da superfície, que logo se propaga devido ao carregamento cíclico, podendo chegar à superfície lascando-a e fazendo surgir uma partícula superficial macroscópica com a correspondente formação de crateração (*pitting*) ou lascamento (*spalling*).

São exemplos deste tipo de falha: mancais de rolamento, dentes de engrenagens, cames e em partes de máquinas que envolvem superfícies em contato com rolamento.

### **Partículas não Ferrosas**

Com o uso do equipamento de ferrografia analítica, os materiais não ferrosos geralmente tendem a se acumularem no anel externo, por que são menos magneticamente atraídos quando comparados com os materiais ferrosos (exceto níquel). As partículas produzidas por metais não ferrosos frequentemente possuem características similares as exibidas por partículas ferrosas, por exemplo, as características observadas nos desgastes por atrito, desgaste por corte e alta tensão no deslizamento estão sempre presentes. A característica distintiva principal dos metálicos não ferrosos é, porém, sua cor.

#### **Cobre**

Quando vistas na luz refletida, as partículas de cobre aparecem com a cor salmão rosa. O alcance do tamanho pode variar consideravelmente, tipicamente de 2 a 100  $\mu\text{m}$  ou mais. A forma da partícula dependerá do mecanismo de desgaste. Ocasionalmente são encontradas partículas de cobre soldadas com partículas metálicas, devido ao mecanismo de uso intrínseco que causa adesão entre os dois materiais.

#### **Bronze ou latão**

Quando vistas na luz refletida, as partículas de latão aparecem com uma cor amarelo ouro e as partículas de bronze com uma cor amarelo/cor-de-rosa escuro. A característica topográfica exibida pela partícula dependerá novamente do mecanismo de desgaste.

#### **Cromo**

As partículas de cromo aparecem com uma coloração prata brilhante quando são vistas por luz refletida. Normalmente elas possuem superfícies lisas nas quais exibem micro trincas, e, predominantemente, possuem tamanhos abaixo de 50  $\mu\text{m}$ . O chapeamento com cromo é uma fonte comum destas partículas.

## Níquel

Estas são similares as partículas de cromo, por também possuírem uma coloração prata brilhante com superfícies lisas, quando vistas por luz refletida. As superfícies são, contudo, normalmente sem traços característicos. Usualmente elas são produto da quebra da placa de níquel. Por causa da sua forte propriedade magnética elas são normalmente encontrada no anel interno de deposito, alcançando tamanhos de 5 a 50  $\mu\text{m}$ .

## Alumínio

Estas aparecem com um tom prateado cinzento quando vistas por luz refletida. As partículas de alumínio normalmente possuem uma superfície com topografia irregular ocasionando assim, uma aparência rugosa. O tamanho das partículas pode variar consideravelmente, sendo normalmente muito grandes (25 a 500  $\mu\text{m}$ ).

A Figura 4.9 ilustra um ferrógrafo analítico juntamente com o seu princípio de funcionamento para a obtenção do ferrograma.

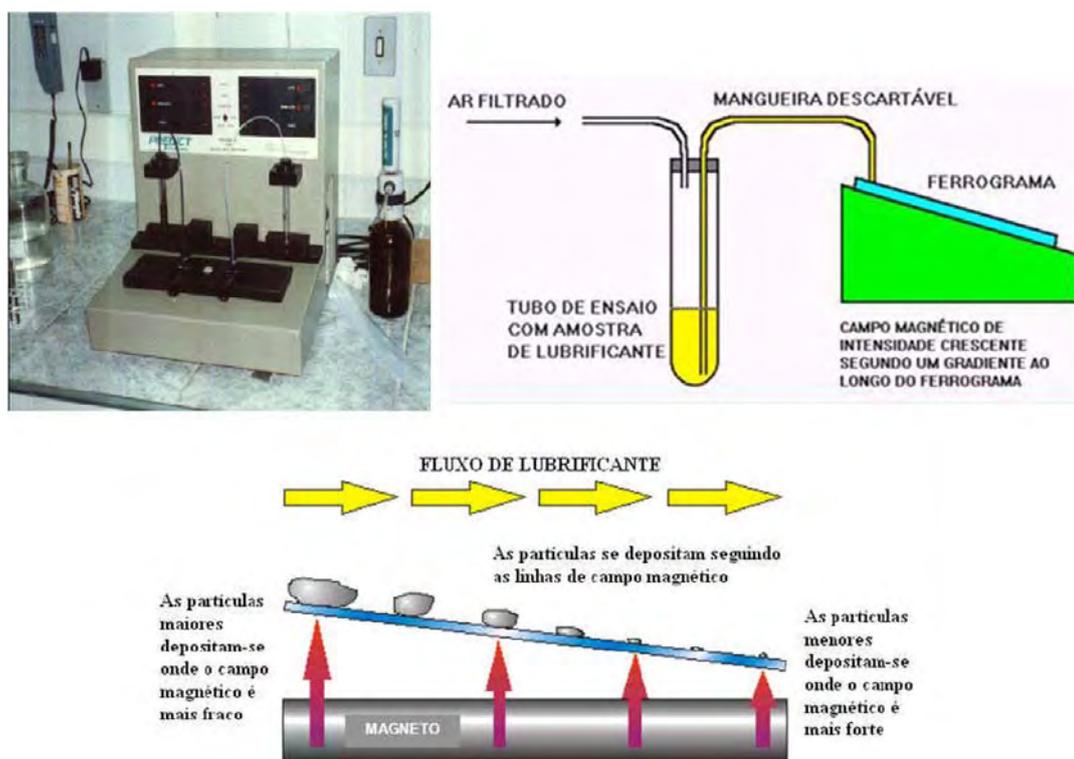


Figura 4.9 – Ferrógrafo analítico FM III, juntamente com seu princípio de funcionamento (Adaptado de LAGO, 2007).

### 4.2.3 – Viscosidade

É a propriedade mais importante dos óleos lubrificantes, podendo ser definida como a tensão de cisalhamento em um plano no fluido por unidade de gradiente de velocidade normal ao plano. A viscosidade pode ser expressa em termos de viscosidade cinemática ( $\text{mm}^2/\text{s}$  ou cSt) ou viscosidade absoluta ou dinâmica (Pa.s).

Sir George Gabriel Stokes (1819 – 1903) foi um matemático e físico irlandês, que fez importantes descobertas para a mecânica dos fluidos, física, matemática e óptica. Ele encontrou uma expressão para a força friccional em objetos esféricos com pequenos números de Reynolds. Seu trabalho em movimentos de fluidos e viscosidade resultou no cálculo da velocidade terminal de uma esfera caindo em um meio viscoso, o que ficou conhecido como Lei de Stokes. Mais tarde, a unidade de viscosidade foi denominada de Stokes em homenagem ao seu trabalho.

Hutchings (1992) define a viscosidade de fluidos newtonianos, em termos da deformação por cisalhamento  $\gamma$ , conforme representado na Equação 4.1.

$$\tau = \eta \cdot \frac{\partial \gamma}{\partial t} \quad (4.1)$$

Onde:

$\tau$  = tensão de cisalhamento (Pa);

$\eta$  = viscosidade dinâmica (Pa.s);

$\frac{\partial \gamma}{\partial t}$  = taxa de deformação por cisalhamento.

A viscosidade cinemática é definida conforme Equação 4.2.

$$Z = \frac{\eta}{\rho} \quad (4.2)$$

Onde:

Z = viscosidade em cSt ou  $\text{mm}^2/\text{s}$ ;

$\rho$  = massa específica.

A Figura 4.10 ilustra um viscosímetro cinemático.

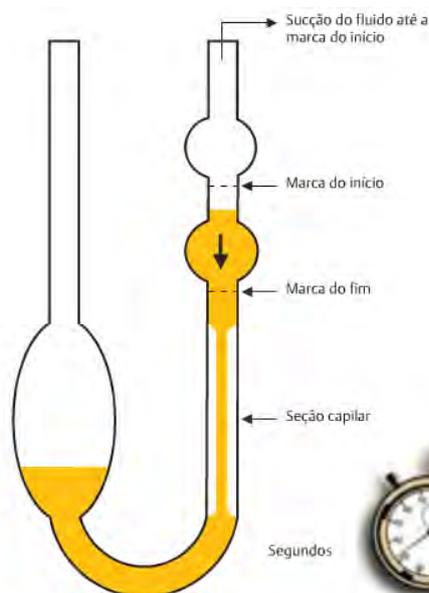


Figura 4.10 – Viscosímetro Cannon-Fenske (TEXACO, 2005).

#### 4.2.4 – Índice de Viscosidade

Normalmente a viscosidade dos fluidos diminui com a temperatura. Assim é definida outra importante propriedade do óleo que é o índice de viscosidade (VI). O índice de viscosidade é um número adimensional, usado para indicar que a viscosidade cinemática depende da temperatura do óleo.

Ela é baseada na comparação da viscosidade cinemática do óleo testado a 40 °C, com a viscosidade cinemática de dois óleos de referências (um VI = 0, e o outro VI = 100) cada um tendo a mesma viscosidade em 100 °C com o óleo testado. As tabelas para o cálculo do VI de uma viscosidade cinemática medida de um óleo a 40 °C e 100 °C são referenciadas na ASTM D2270, conforme mostra a Figura 4.11.

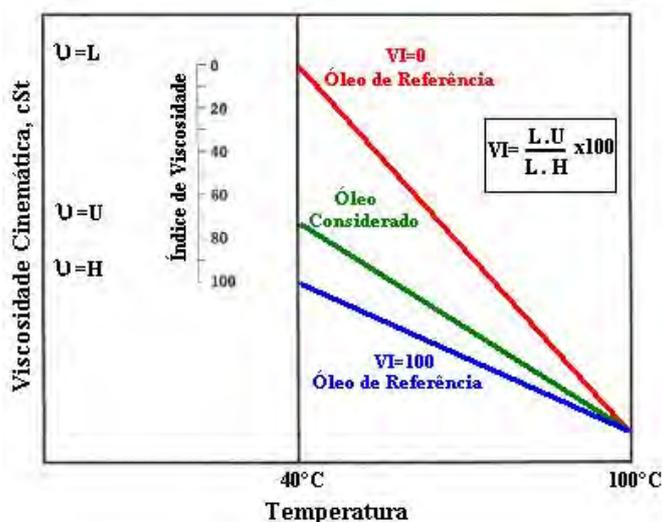


Figura 4.11 – Determinação do índice de viscosidade (BARNES, 2002).

Segundo a Figura 4.11, um óleo com menor mudança na viscosidade cinemática com a temperatura terá um VI mais alto que um óleo com maior mudança de viscosidade para a mesma variação de temperatura.

A maioria das parafinas, solventes-refinados, minerais-baseados em óleos industriais, possuem VIs típicos no intervalo de 90 a 105. Entretanto, muitos óleos minerais altamente refinados, sintéticos e óleos com VI melhorado possuem VIs que excedem 100. Óleos sintéticos do tipo PAO (*Poli Alfa Olefin*) possuem VIs na faixa de 130 a 150 (BARNES, 2002).

#### 4.2.5 – Densidade

A densidade pode ser definida como o número que determina o peso de certo volume de uma substância quando ela estiver submetida a uma determinada temperatura. Assim, se um óleo possui densidade de 0,8 g/cm<sup>3</sup> a 25 °C, significa que nesta temperatura, 1 cm<sup>3</sup> do óleo pesa 0,8 g.

O método usual para sua determinação é mergulhar no óleo um densímetro, que fica em equilíbrio a certa profundidade. Nesta haste graduada lê-se, ao nível da superfície, a valor da densidade. Conforme ilustrado na Figura 4.12.

No Brasil, a temperatura normal de referência do produto é 20 °C, podendo em alguns casos ser expressa a 15 °C ou 25 °C. Caso a temperatura de ensaio seja diferente, faz-se a conversão para a temperatura desejada através de fórmulas ou tabelas.

A maior utilização da densidade em óleos lubrificantes é na conversão de peso em volume, e vice-versa. Mas ela também é utilizada para fins de controle da fabricação do óleo, além de ser um dado fundamental para o projeto de trocadores de calor.



Figura 4.12 – Densímetro digital e Analógico (Adaptado de: <http://www.multitecrs.com.br>, 2009).

#### 4.2.6 – Ponto de fulgor

Caracteriza-se como sendo a menor temperatura de um óleo na qual o vapor liberado na atmosfera, inflama-se momentaneamente com a aplicação de uma chama, formando assim um lampejo ou *flash*.

A Figura 4.13 apresenta o equipamento utilizado para obter o ponto de fulgor de vaso aberto.



Figura 4.13 – Método Cleveland para obter o ponto de fulgor.

A determinação do ponto de fulgor mais empregada é feita seguindo a norma ASTM D92-52, através do aparelho Cleveland. Quando a temperatura chega próxima ao

ponto de fulgor previsto, usa-se uma chama esférica sob o óleo que está sendo aquecido no aparelho.

Um detalhe importante é distinguir o ponto de fulgor do ponto de combustão que é a temperatura na qual os vapores de óleo queimam de modo contínuo, durante um mínimo de 5 segundos. Normalmente o ponto de combustão é, em média 22 a 28 °C acima do ponto de fulgor. Outro ponto a ser esclarecido é a diferença do ponto de fulgor e de combustão com o ponto de auto-inflamação do lubrificante, que é a temperatura na qual o óleo se inflama espontaneamente, sem o contato com a chama.

O conhecimento do ponto de fulgor permite avaliar as temperaturas de serviços que um óleo lubrificante pode suportar com absoluta segurança. Óleos com ponto de fulgor inferior a 150 °C não devem ser empregados para fins de lubrificação. Esse é um tipo de teste que avalia o nível de contaminação por combustível no óleo (MOURA; CARRETEIRO, 1978).

#### **4.2.7 – Ponto de Fluidez**

Também conhecido como “ponto de gota” para graxas ou “ponto de congelamento”, é a temperatura mínima na qual o óleo ainda é capaz de fluir, temperatura essa determinada pelo padrão ASTM D97-47 por meio de resfriamentos sucessivos de amostras de óleo colocadas em frascos de vidro. O teste consiste em a cada intervalo de 5 em 5 °F verificar se o óleo ainda é capaz de fluir (MOURA; CARRETEIRO, 1978).

Se esta superfície permanecer imóvel por mais de 5 segundos foi atingido o ponto de congelamento do óleo. A temperatura 3 °C acima desta é o ponto de mínima fluidez.

Por exemplo, se um óleo apresentar um ponto de congelamento de -20 °C, seu ponto de mínima fluidez será de -17 °C. O equipamento é demonstrado na Figura 4.14.

Os lubrificantes automotivos possuem ponto de fluidez em geral abaixo de 0 °C, e assim, é desnecessário a sua especificação em regiões com climas tropicais. O ponto de fluidez só interessa no emprego de lubrificantes para máquinas frigoríficas.



Figura 4.14 – Equipamento para medir ponto de fluidez.

#### 4.2.8 – *Total Acid Number/Total Base Number*

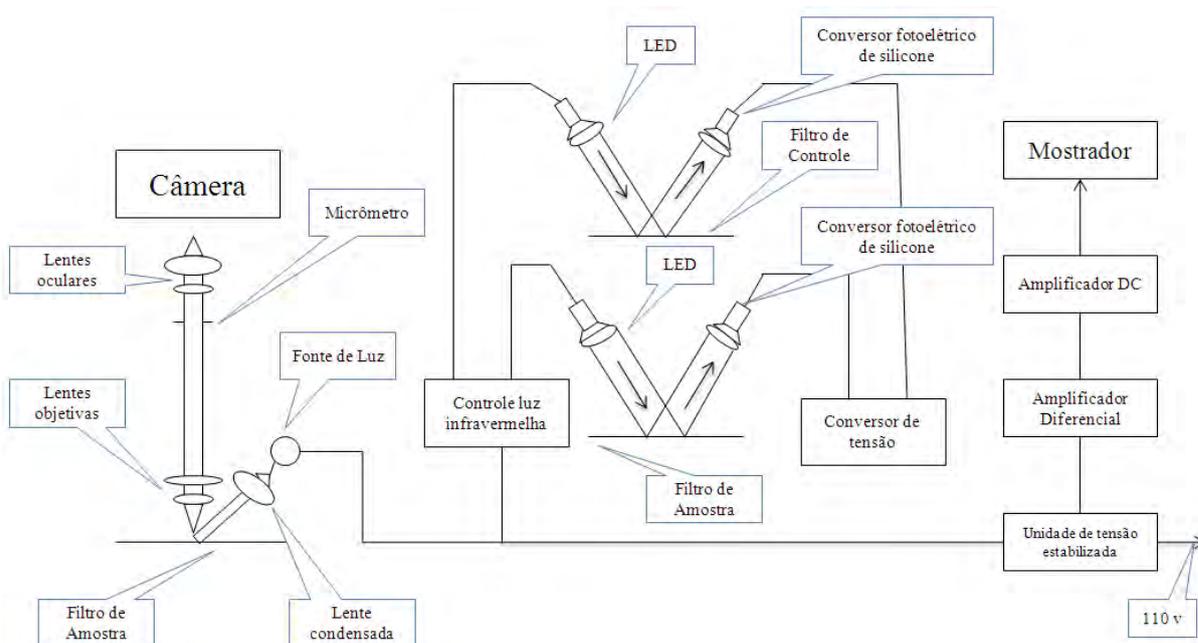
O TBN (*Total Base Number*) determina a eficácia no controle dos ácidos que surgem durante o processo de combustão. Quanto maior o TBN, maior a eficácia em eliminar os contaminadores que causam o desgaste e em reduzir os efeitos corrosivos dos ácidos sobre um período de tempo prolongado. A medida associada ASTM D2896 ou NBR 05798 varia geralmente de 6 a 80 mg KOH/g em lubrificantes modernos, de 7 a 10 mg KOH/g para o uso automotriz geral e de 10 a 15 mg KOH/g para operações a Diesel. Os lubrificantes marinhos geralmente funcionarão de 15 a 50 mg KOH/g, mas podem ser tão elevados como 70 ou 80 mg KOH/g. Quando o TBN é medido em 2 mg KOH/g ou menos, o lubrificante é considerado inadequado para a proteção do motor, com isto pode ocorrer a corrosão. Um combustível com teor maior de enxofre diminuirá o TBN mais rapidamente devido ao aumento de ácido sulfúrico.

O TAN (*Total Acid Number*) representa a massa em mg KOH/g necessária para neutralizar um grama de óleo: é a medida de todas as substâncias contidas no óleo que reagem com hidróxido de potássio. Os constituintes mais comuns de tais produtos ácidos são ácidos orgânicos, sabões de metais, produtos de oxidação, nitritos e nitrocompostos e, ainda, outros compostos, que podem estar presentes como aditivos e que reagem com hidróxido de potássio (MALPICA, 2007).

Com o resultado da progressiva oxidação do óleo, podem ocasionar na formação de ácidos orgânicos; sendo que os sabões metálicos são, então, resultantes da reação destes ácidos com metais.

#### 4.2.9 – Concentração de Partículas

Atualmente existem vários testadores automáticos de partículas, alguns podem relacionar a quantidade de partículas não ferrosas, partículas ferrosas ou o número de partículas totais. Por exemplo, o *Contameter* Toshiba foi concebido não só para fornecer um exame visual para o microscópio, como também pode detectar partículas pela absorção de raios infravermelhos, (independentemente da coloração do lubrificante), sendo seu princípio de funcionamento é mostrado na Figura 4.15.

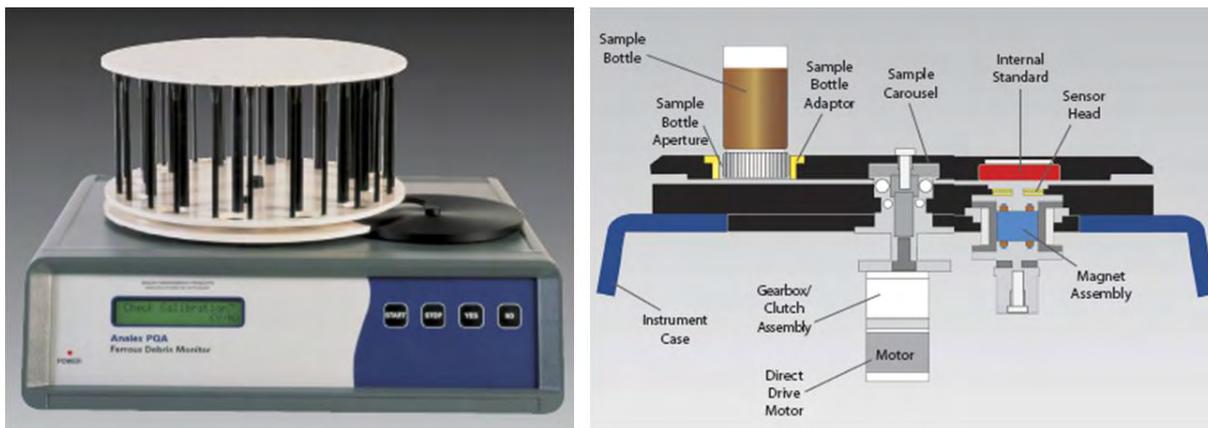


**Figura 4.15 – Princípio de funcionamento equipamento Contameter TOSHIBA (ROYLANCE; HUNT, 1999).**

Outro tipo de equipamento comumente usado é o monitor automático de partículas (PQA). Ele examina a amostra por meio de um campo indutivo, que ao detectar a presença de materiais magnéticos apresenta o resultado na forma de um índice adimensional chamando índice PQ. Este índice é diretamente relacionado com a quantidade de materiais ferromagnéticos contidos no óleo, informação muito útil na construção dos gráficos de tendências.

O tamanho de influência é de alguns microns a cerca de 1 mm, e, portanto, abrange tamanhos de partículas de desgaste normais.

Na Figura 4.16, é mostrado um monitor automático de partículas (PQA), juntamente com o seu diagrama de funcionamento.



**Figura 4.16 – Monitor automático de partículas e diagrama de funcionamento**  
(2009, <<http://www.kittiwake.com/ANALEXrpD.htm>>).

#### 4.2.10 – Filtragem por Membrana e Contagem de partículas

Com a operação normal do equipamento, gera-se uma variedade de contaminantes, como metais de desgaste, oxidação e outros subprodutos, que devem ser levados pelo lubrificante para assegurar o funcionamento adequado, além disso, o óleo também é exposto a contaminantes externos, tais como água, sujeira e/ou combustível. Lubrificantes e sistemas hidráulicos contêm filtros para reduzir ou eliminar e/ou reduzir os níveis de contaminação.

A limpeza do óleo é de extrema importância em todas as máquinas lubrificadas e em particular em equipamentos de folgas ultrafinas, como o rolamento anti-atrito em motores de aviões e servo-válvulas em sistemas hidráulicos. Na verdade, as partículas de desgaste, na faixa de tamanho de 2 a 10  $\mu\text{m}$ , são responsáveis por até 80 % de falhas no sistema hidráulico. Conseqüentemente, a filtração de óleo é um aspecto importante de lubrificação de equipamentos e de particular interesse para o analista de petróleo.

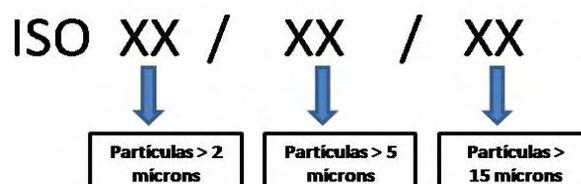
Para avaliar o estado do óleo lubrificante, a técnica da filtragem por membrana retém os particulados através de elemento filtrante de alta precisão com *mesh* de 5  $\mu\text{m}$ , e, com a análise em microscópio, permite a visualização das partículas e a contagem comparativa dos elementos presentes na amostra.

O método padrão para quantificar a limpeza do lubrificante tem sido publicado pela ISO (*International Standards Organization*). A ISO estabeleceu a norma ISO 4406 para relacionar a contagem de partículas em níveis de limpeza do fluido que permite o estabelecimento de limites e alarmes para avisar quando a contaminação é excessiva. A norma ISO é representada por um sistema de dois ou três dígitos, a saber:

✓ Sistemas de dois dígitos: São utilizados para quantificar partículas em sistemas de limpeza em lubrificantes e sistemas hidráulicos usados em geral na indústria. O primeiro dígito, indica a contagem de partículas acima de 5  $\mu\text{m}$  e o segundo dígito indica a contagem de partículas superiores a 15  $\mu\text{m}$ . O nível de contaminação é indicado pelos desvios dos valores do sistema normal.

✓ Sistemas de três dígitos: O sistema foi proposto pela corporação Pall e Vickers Inc. como um meio para proteger e monitorar sistemas de servo válvulas ou sistemas hidráulicos de alto desempenho. O primeiro dígito indica a contagem de partículas acima de 2  $\mu\text{m}$ , o segundo indica o numero de partículas acima de 5  $\mu\text{m}$  e o terceiro dígito representa a contagem de partículas acima de 15  $\mu\text{m}$ .

Sucintamente o código ISO de classificação de contagem de partículas é representado na Figura 4.17.



**Figura 4.17 – Representação classificação ISO 4406 para contagem de partículas.**

A nova ISO 11171 substituiu a ISO 4406 em aceitação da ISO MTD (*Medium Test Dust*) como uma substituição da ACFTD (*Air Cleaner Fire Test Dust*). A maioria das versões extensamente usadas desta norma técnica, referem ao número de partículas maiores que 4, 6, e 14  $\mu\text{m}$  em 1 ml de fluido. O número de partículas 4+ e 6+ são usados como um ponto de referência de partículas. O tamanho 14+ indica a quantidade de partículas grandes presentes, as quais contribuem grandemente para a possível falha catastrófica da máquina.

A Tabela 4.5 demonstra os valores do sistema ISO para determinação da quantidade de partículas.

Tabela 4.5 – Sistema de classificação ISO para partículas (Adaptado de MALPICA, 2007).

CÓDIGO ISO	Quantidade de partículas por ml	
	Mínimo	Máximo
1	0,01	0,02
2	0,02	0,04
3	0,04	0,08
4	0,08	0,16
5	0,16	0,32
6	0,32	0,64
7	0,64	1,3
8	1,3	2,5
9	2,5	5
10	5	10
11	10	20
12	20	40
13	40,0	80
14	80	160
15	160	320
16	320	640
17	640	1300
18	1300	2500
19	2500	5000
20	5000	10000
21	10000	20000
22	20000	40000
23	40000	80000
24	80000	160000
25	160000	320000
26	320000	640000
27	640000	1300000
28	1300000	25000000

A contagem de partículas é usada extensamente para monitorar os sistemas hidráulicos, onde as partículas de desgaste são maiores que  $10 \mu\text{m}$  (além dos limites da espectrografia normal). Muitas indústrias publicam níveis recomendados de contagem de partículas. A contagem de partícula é mais apropriada quando os mecanismos de fadiga são meios preliminares da falha ou quando as partículas de contaminantes causam abrasão (LAGO, 2007).

## 5 – MATERIAIS E MÉTODOS

### 5.1 – INTRODUÇÃO

O trabalho consiste na utilização de três motores idênticos, com ignição por compressão, da marca Toyama. Motores desse porte são utilizados na finalidade de geração de energia elétrica, acionamento de motobombas para sistemas de irrigação, acionamento de motocultivadores dentre outras atividades.

A Figura 5.1 mostra as características de fabrica dos motores empregados nos testes



Descrição	Unidade	Valor
Potência Máxima	HP	10
Potência Nominal	HP	9
Cilindrada	Cc	406
Ciclo de Trabalho		4 ciclos
Sistema de Injeção		Injeção direta
Rotação Máxima	Rpm	3600
Taxa de Compressão		23:1
Reservatório de Combustível	L	5,5
Reservatório de Lubrificante	L	1,65

**Figura 5.1 – Características do motor usado nos testes (2009 <<http://www.toyamapower.com.br>>).**

Vale destacar que o presente trabalho é uma parte integrante de um projeto de estudo global, que tem como principal objetivo analisar comparativamente os níveis de desgaste e as possíveis influências que o uso de Biodiesel acarreta sobre os motores.

Na parcela do projeto compreendida a este trabalho, os motores não foram acoplados a qualquer tipo de equipamento, foram construídas estruturas metálicas para suporte do motor, juntamente com o sistema de amortecimento a fim de reduzir vibrações, tais estruturas foram previamente desenvolvidas para que, em estudos posteriores,

equipamentos como geradores elétricos ou bombas hidráulicas, possam ser utilizados a fim de comparar os resultados.

No primeiro banco de ensaios (motor M1), utilizou-se Biodiesel de origem animal, na segunda (motor M2) utilizou-se o Diesel comercial B3 e na terceira (motor M3) utilizou-se uma mistura de Biodiesel com 90% de origem vegetal acrescido de 10% de origem animal.

Todos os motores funcionaram durante um período de 20 horas antes de se executar os ensaios. Este período foi estabelecido segundo o fabricante dos motores como sendo o período de amaciamento.

Para cada banco de ensaios (Motor) foram realizados cinco ensaios. Um ensaio no amaciamento, um ensaio sem contaminação do lubrificante, e três ensaios com contaminação líquida com o próprio combustível (1, 2 e 3 % em volume do cartér do motor).

Os ensaios realizados após o amaciamento e tiveram duração de 40 horas cada.

Durante o amaciamento a rotação foi controlada a  $2500 \pm 100$  rpm e durante os demais ensaios as rotações foram controladas a  $3000 \pm 100$  rpm através de um tacômetro digital da marca LUTRON modelo DT2236.

A Figura 5.2 esquematiza os casos estudados no trabalho.

<b>M1</b>		<b>M2</b>		<b>M3</b>	
Combustível usado	Biodiesel Puro (origem animal)	Combustível usado	Diesel comercial B3	Combustível usado	Biodiesel Puro (90% origem vegetal, 10% animal)
Período de Amaciamento	20 horas	Período de Amaciamento	20 horas	Período de Amaciamento	20 horas
Rotação média do motor no período de amaciamento	2500 rpm	Rotação média do motor no período de amaciamento	2500 rpm	Rotação média do motor no período de amaciamento	2500 rpm
Período de ensaio efetivo	40 horas para cada ensaio	Período de ensaio efetivo	40 horas para cada ensaio	Período de ensaio efetivo	40 horas para cada ensaio
Rotação média do motor no período de ensaio	3000 rpm	Rotação média do motor no período de ensaio	3000 rpm	Rotação média do motor no período de ensaio	3000 rpm
Quantidade de ensaios	5	Quantidade de ensaios	5	Quantidade de ensaios	5
Níveis de contaminação por combustível (Biodiesel de origem animal)	0%, 1%, 2% e 3% em volume do reservatório de lubrificante	Níveis de contaminação por combustível (Diesel B3)	0%, 1%, 2% e 3% em volume do reservatório de lubrificante	Níveis de contaminação por combustível (Biodiesel de origem vegetal+animal)	0%, 1%, 2% e 3% em volume do reservatório de lubrificante

**Figura 5.2 – Esquematização dos ensaios realizados.**

O lubrificante utilizado nos três motores obedece as recomendações do fabricante, tendo sido selecionado o lubrificante de classificação SAE 40 API CF. Na Tabela 5.1 são descritas as propriedades físico-químicas desse lubrificante.

**Tabela 5.1 – Propriedades físico-químicas do lubrificante usado (PETROBRAS, 2008).**

<b>Marca</b>	<b>Petrobras</b>
<b>Modelo</b>	Lubrax MD 400
<b>SAE</b>	40
<b>API</b>	CF
<b>Ponto de fulgor (°C)</b>	262
<b>Ponto de congelamento (°C)</b>	-6
<b>Viscosidade a 40 °C (cSt)</b>	163,5
<b>Viscosidade a 100 °C (cSt)</b>	15,46
<b>Índice de Viscosidade</b>	95

## 5.2 – DEPOSITADOR ROTATIVO DE PARTÍCULAS (RPD)

O depositador rotativo de partículas é utilizado para se obter ferrogramas, seu funcionamento segue o princípio do ferrógrafo convencional. No entanto, a amostra sofre a ação de forças magnéticas, centrífugas e gravitacionais que atuam sobre a mesma. As partículas são depositadas sobre uma lâmina de polímero de borosilicato, formando três anéis concêntricos, durante esta deposição ocorre uma separação das partículas em relação ao seu tamanho, na qual partículas maiores (1 a 200  $\mu\text{m}$ ) se depositaram no anel interno, médias (1 a 50  $\mu\text{m}$ ) no anel médio e partículas pequenas (1 a 10  $\mu\text{m}$ ) no anel externo. As lâminas de polímero são observadas em um microscópio óptico, uma vez que se deseja saber a forma, tamanho, concentração e composição das partículas presentes.

Na Figura 5.3 é demonstrado o equipamento RPD e a lâmina de amostra do ferrograma.

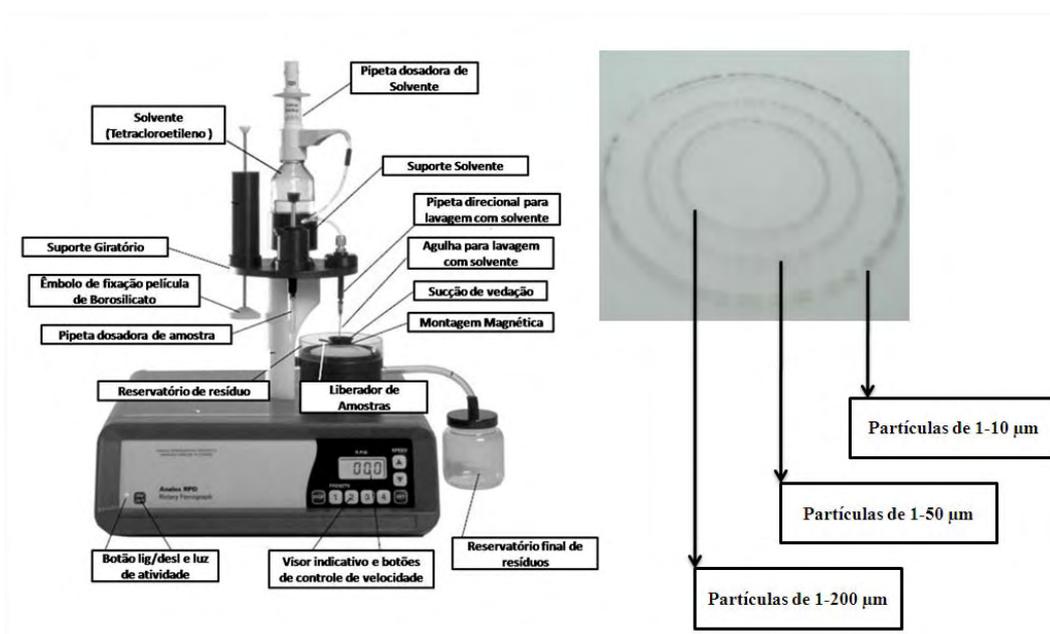


Figura 5.3 – RPD e ferrograma obtido.

O RPD possui quatro níveis de velocidade, em cada nível, a velocidade de rotação aumenta gradativamente partindo de 70 até 200 rpm's. Para construir o ferrograma alguns passos devem ser seguidos:

- 1 – A amostra de óleo deve estar homogênea;
- 2 – O óleo deve ser previamente aquecido a uma temperatura de 60 °C, durante 30 minutos;
- 3 – Fixar a plaqueta de borosilicato, com o êmbolo de fixação;
- 4 – Depositar com a pipeta dosadora de amostra o lubrificante aquecido;

- 5 – Usar o equipamento na velocidade 1 (70 rpm) e gotejar 1 ml de tetracloroetileno;
- 6 – Alterar o equipamento para velocidade 2 (100 rpm) e gotejar 1 ml de tetracloroetileno. Parar a rotação, verificar se o filme de lubrificante ainda esta presente, caso esteja, repita os passos 5 e 6 até a diminuição do filme de óleo;
- 7 – Alterar para a velocidade 3 (130 rpm) e gotejar 1 ml de tetracloroetileno;
- 8 – Mudar para a velocidade 4 (200 rpm) por alguns minutos para finalizar a amostra.

A Figura 5.4 detalha os itens do equipamento juntamente com as suas especificações técnicas.



**Especificações técnicas equipamento RPD**

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)

**Figura 5.4 – Especificações técnicas do RPD (2009, <<http://www.kittiwake.com/ANALEXrpD.htm>>).**

### 5.3 – MICROSCÓPIO ÓPTICO

O microscópio óptico de varredura tem papel importante na análise morfológica das partículas, no trabalho foi utilizado o equipamento da marca Carl Zeiss de Jena, modelo NEOPHOT 21, para o caso, foram utilizadas lentes objetivas com aumento de 50 vezes.

Para avaliar a morfologia das partículas ferrosas das amostras realizadas no RPD, as amostras foram fotografadas com aumentos de 500 e 1000 vezes.

A Figura 5.5 mostra o microscópio óptico utilizado nos ensaios, juntamente com a plaqueta de borosilicato contendo a amostra obtida em RPD.

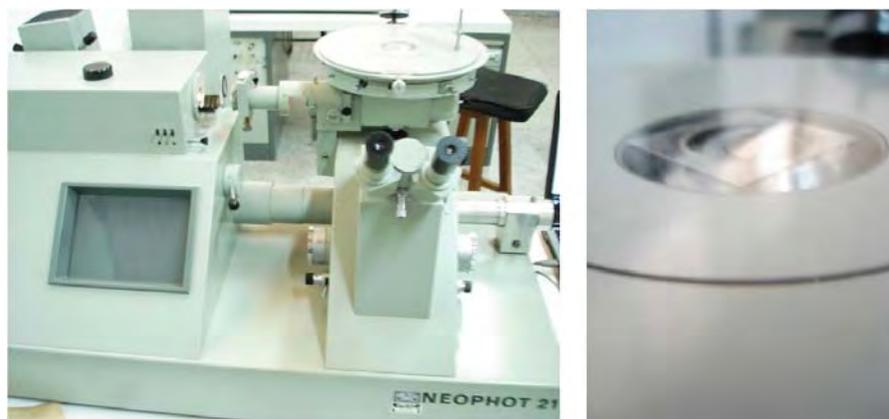


Figura 5.5 – Microscópio utilizado nos ensaios, juntamente com detalhe da película de amostra.

#### 5.4 – VISCOSÍMETRO

As viscosidades foram obtidas seguindo a norma ASTM D445. O viscosímetro utilizado foi o viscosímetro cinemático, calibrado e em banho térmico controlado a 40 °C.

Para uma análise comparativa dos resultados, foi empregado um reômetro da marca Brookfield, controlado via *software*. O equipamento também é dotado de um banho térmico a água, mantendo a temperatura do fluido de circulação nas faixas de 40 °C e 100 °C.

A Figura 5.6 demonstra o viscosímetro cinemático e o reômetro usado nos ensaios.



Figura 5.6 – Reômetro e viscosímetro cinemático usado.

#### 5.5 – MONITOR DE PARTÍCULAS FERROSAS (PQA)

Dentre os vários equipamentos empregados para o monitoramento da quantidade de partículas ferrosas, o utilizado para os ensaios foi o PQA (*Particle Quantifier Analysis*) da fabricante Kittiwake.

Trata-se de magnetômetro com duas bobinas organizadas de forma que a bobina de amostra (sensor) e a bobina de referência estão em equilíbrio quando não há nenhuma

amostra no sensor. O sistema é projetado para assegurar cuidadosamente que ambas as bobinas responda igualmente as mudanças na temperatura 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 PQA é diretamente controlado por botões montados no painel dianteiro ou remotamente via *software*. Antes do início das medidas, é preciso configurar e calibrar o equipamento, assegurando, assim, a qualidade e estabilidade dos resultados. Para tal, um padrão do “índice” PQ é utilizado, conhecido como padrão 750.

Posteriormente ao processo de calibração e configuração, dá-se início as medidas, onde amostras de 2 ml são colocadas em um recipiente plástico apropriado através de uma pipeta, e, assim, alojadas no carrossel de amostras do equipamento. Depois de efetuadas as medidas, cada pote é entregue a uma calha de disposição.

O processo de medição é repetido 5 vezes e, posteriormente, são calculadas as médias aritméticas dos resultados.

A Figura 5.7 mostra o equipamento PQA, juntamente com o padrão de calibração e o modelo das amostras para a realização do ensaio.



Figura 5.7 – Equipamento PQA, com amostra de lubrificante e padrão de calibração.

As principais características do equipamento são representadas na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Especificações do PQA (2009, <<http://www.kittiwake.com/ANALEXpqA.htm>>).

<b>Especificações técnicas equipamento PQA</b>	
<b>Fabricante</b>	<b>Kittiwake Developments Ltda</b>
<b>Tensão nominal</b>	<b>110/240 V</b>
<b>Frequência</b>	<b>47 a 63 Hz</b>
<b>Consumo</b>	<b>15 Watts</b>
<b>Diâmetro máximo das amostras</b>	<b>53 mm</b>
<b>Condições de temperatura ambiente</b>	<b>20°C - 30°C</b>

## 5.6 – CONTADORES DE PARTÍCULAS

Dentre as técnicas de contagem de partículas, onde muitas, utilizam equipamentos de alta tecnologia, a técnica empregada neste trabalho, consiste na visualização de membrana de celulose de porosidade de 5  $\mu\text{m}$  em microscópio óptico.

Para a contagem comparativa das partículas existentes no óleo lubrificante, foram analisadas as membranas de filtração. Cada amostra de óleo possui a sua respectiva membrana de filtração, na qual foram observadas em microscópio óptico de varredura, com lente objetiva de 50 vezes e aumentos de 500 e 1000 vezes.

Outro tipo de análise que pode ser empregada trata-se da medição do peso da membrana de filtração em balança digital de precisão, na qual a membrana é pesada antes e depois da filtração, traçando assim, uma analogia com a quantidade de partículas ferrosas ou não, presentes na amostra de óleo.

O processo de contagem seguiu basicamente os parâmetros da norma ISO 4406, atual ISO 11171.

## 5.7 – PONTO DE FULGOR

Para a análise do ponto de fulgor das amostras, foram seguidos os procedimentos da norma ASTM D92-52, 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 abaixo:

- 1 – Deixar a amostra homogênea;
- 2 – Depositar a amostra no recipiente do equipamento;
- 3 – Aquecer gradativamente o óleo e monitorar a temperatura via termômetro de tubo de mercúrio;
- 4 – Acender a chama do equipamento, passar rapidamente sobre o vapor do óleo lubrificante;
- 5 – Ao primeiro lampejo de chama, anotar a temperatura e comparar com o valor de fulgor descrito na ficha técnica do óleo lubrificante novo.

Observando o ponto de fulgor muito abaixo da estipulada 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.

## **5.8 – FILTRAGEM POR MEMBRANA DE CELULOSE**

O processo de filtragem por membrana é uma técnica que avalia as partículas presentes no óleo, ferrosas ou não, avaliando os contaminantes sólidos presentes na amostra.

Esta técnica é predominantemente usada para filtragem de fluidos hidráulicos, no entanto, esta começando a ser difundido para uso em óleos lubrificantes convencionais, seu uso esta diretamente ligada a análise do teor de carbono, quantidade de metais e insolúveis sólidos.

Para tal filtragem, é utilizado o pentano ou hexano como solvente, seguindo alguns passos descritos a seguir:

- 1 – Homogeneizar a amostra;
- 2 – Misturar em uma proveta 5 ml de pentano com 10 ml da amostra;
- 3 – Preparar os acessórios e acoplar a membrana de celulose com porosidade de 5  $\mu\text{m}$  no local indicado;
- 4 – Colocar a solução solvente-amostra na seringa e esperar o término da filtragem;
- 5 – Após a filtragem da amostra, “lavar” a membrana com 3 ml de pentano, até observar que o resíduo da filtragem seja o mais límpido possível.

Na Figura 5.8 é apresentado resumidamente os procedimentos para a filtragem.



**Figura 5.8 – Aparato para a filtração por membrana de celulose.**

## **5.9 – ESPECTROGRAFIA POR ABSORÇÃO ATÔMICA**

A espectrografia por absorção atômica das amostras foi realizada em laboratório terceirizado, devidamente credenciado pelos órgãos de calibração responsáveis.

O laboratório São José – Análise de Lubrificante foi o responsável pela análise, situado na cidade de Ribeirão Preto-SP.

## **6 – RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Para melhor entendimento, os resultados estão dispostos de acordo com a análise realizada nas amostras de óleo lubrificante coletado durante os ensaios.

Foram realizadas para cada caso estudado as seguintes análises:

- ✓ Ferrografia Analítica;
- ✓ Espectrografia por Absorção Atômica;
- ✓ Viscosidade;
- ✓ Teor de Água;
- ✓ Ponto de Fulgor;
- ✓ Monitoramento de partículas magnéticas;
- ✓ Filtragem por membrana de Celulose;
- ✓ Contagem de Partículas por Classificação ISO;
- ✓ TBN.

### **6.1 – FERROGRAFIA ANALÍTICA**

Foram realizadas a ferrografia analítica em cada etapa do projeto, ou seja, no período “amaciamento”, e com níveis de 0, 1, 2 e 3% de contaminação por combustível no óleo lubrificante utilizado nos motores. As amostras foram obtidas em RPD e fotografadas em microscópio óptico.

Nas Figuras 6.1 a 6.15 são apresentadas as imagens das amostras dos óleos lubrificantes. Para melhor comparação visual, as imagens estão organizadas por nível de contaminante líquido no lubrificante e com aumentos de 500 e 1000 vezes, além disso, são destacadas em cada imagem as fotografias de cada anel do ferrograma.











Devido aos motores terem operados sem carga acoplada, as imagens apresentadas acima não apresentaram indício de desgaste anormal ou severo. Pode-se dizer que todas as lâminas fotografadas apresentaram desgastes conhecidos como benigno, isto é, desgaste natural dos componentes. Algumas partículas apresentaram dimensões que se destacaram em relação as demais, como é o exemplo da Figura 6.11, tal aparição pode ocorrer mesmo em condições de desgaste normal, no entanto, se houver a presença de uma quantidade maior desse tipo de partícula, seria considerado um indicio de desgaste anormal no sistema.

## 6.2 – ESPECTROGRAFIA POR ABSORÇÃO ATÔMICA

Esta análise tem por objetivo avaliar de maneira quantitativa, os principais elementos presentes na amostra de óleo lubrificante. A Tabela 6.1, apresenta os valores obtidos em laboratório para as partículas de Cobre, Silício, alumínio, Ferro, Chumbo, Cromo e Níquel.

**Tabela 6.1 – Valores da Absorção Atômica dos elementos.**

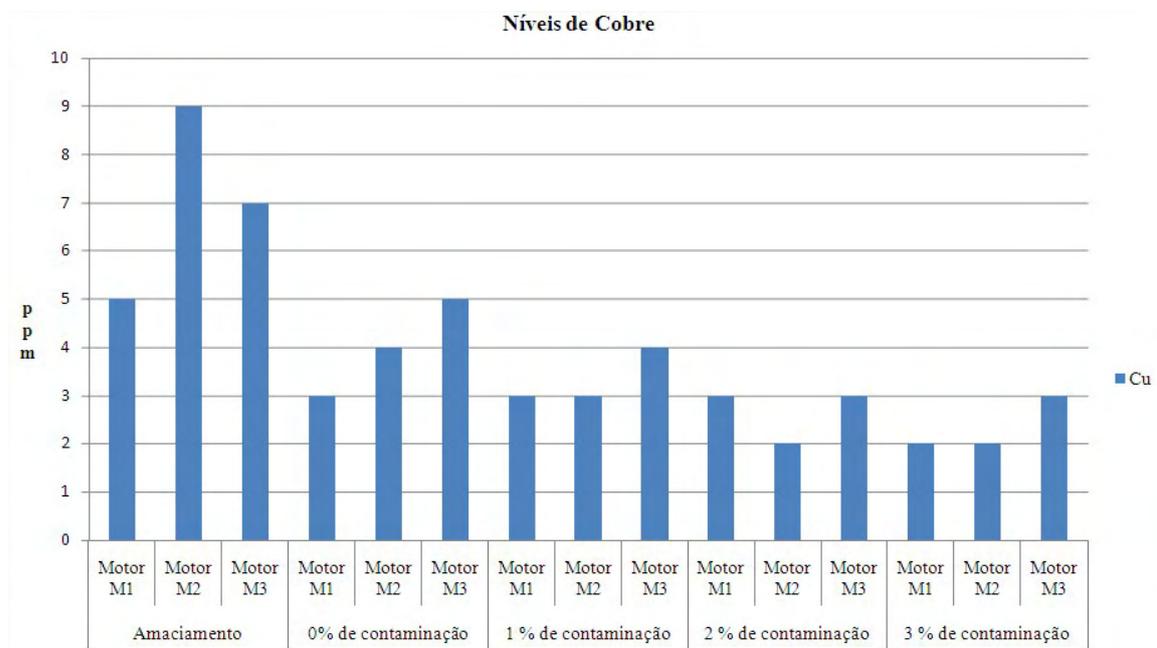
Nível de contaminação por combustível	Motores	Cu (ppm)	Si (ppm)	Al (ppm)	Fe (ppm)	Pb (ppm)	Cr (ppm)	Ni (ppm)
<b>Amaciamento</b>	Motor M1 <sup>(1)</sup>	5	17	5	35	33	8	0
	Motor M2 <sup>(2)</sup>	9	21	8	35	22	8	1
	Motor M3 <sup>(3)</sup>	7	16	3	24	37	7	0
<b>0% de contaminação</b>	Motor M1 <sup>(1)</sup>	3	13	2	25	25	9	1
	Motor M2 <sup>(2)</sup>	4	16	3	25	9	7	1
	Motor M3 <sup>(3)</sup>	5	19	4	22	34	7	1
<b>1% de contaminação</b>	Motor M1 <sup>(1)</sup>	3	18	2	20	18	7	1
	Motor M2 <sup>(2)</sup>	3	17	5	26	4	6	1
	Motor M3 <sup>(3)</sup>	4	14	2	18	29	6	0
<b>2% de contaminação</b>	Motor M1 <sup>(1)</sup>	3	14	1	20	15	6	1
	Motor M2 <sup>(2)</sup>	2	16	3	25	5	6	1
	Motor M3 <sup>(3)</sup>	3	13	2	17	29	6	0
<b>3% de contaminação</b>	Motor M1 <sup>(1)</sup>	2	13	1	19	12	6	0
	Motor M2 <sup>(2)</sup>	2	4	3	21	29	6	0
	Motor M3 <sup>(3)</sup>	3	14	3	17	30	6	0

Notas: <sup>(1)</sup> Motor operando com Biodiesel B100 de origem animal;

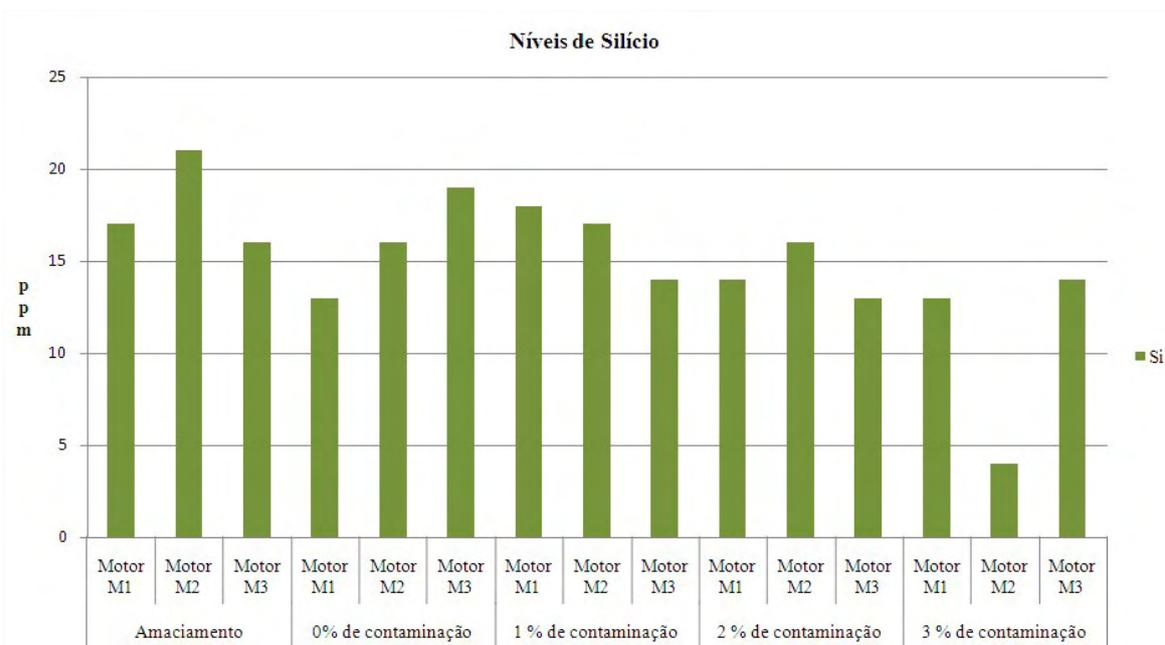
<sup>(2)</sup> Motor operando com Diesel comercial B3;

<sup>(3)</sup> Motor operando com Biodiesel B100 (90% origem vegetal, 10% animal).

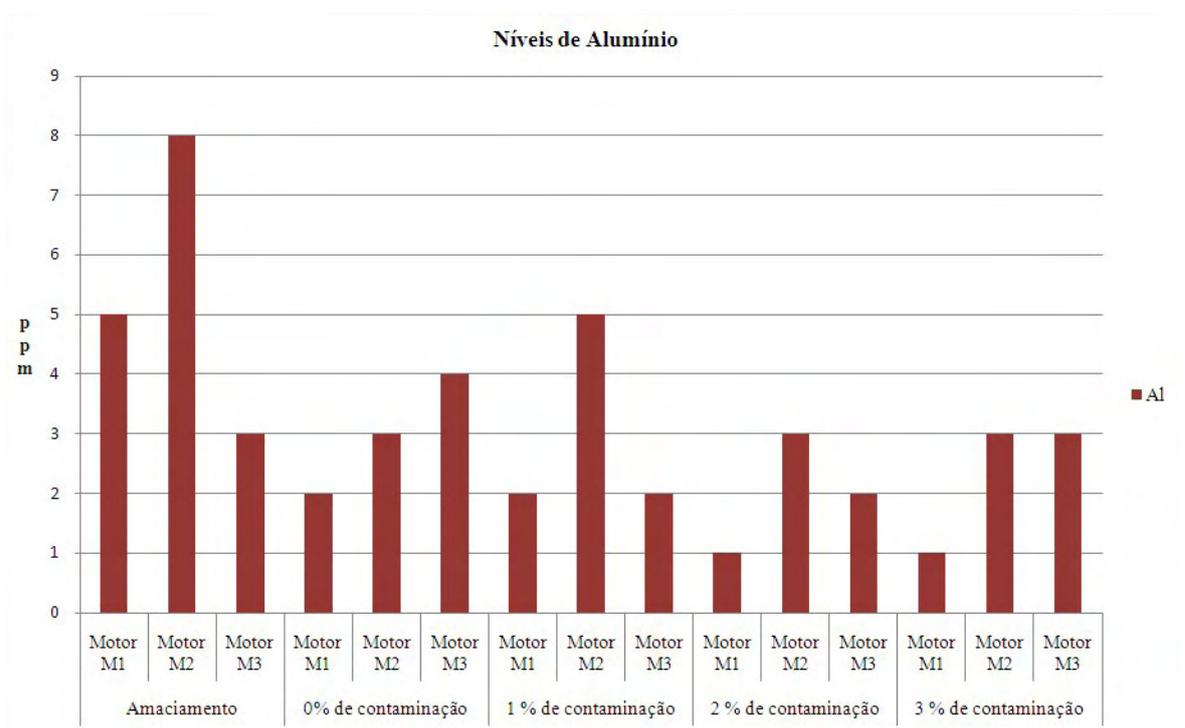
Através das Figuras 6.16 a 6.22, são representados as quantidades em ppm (partes por milhão) dos níveis dos principais elementos encontradas nas amostras de óleo e organizadas por nível de contaminação dos motores M1, M2 e M3.



**Figura 6.16 – Níveis de cobre obtidos via Absorção Atômica.**



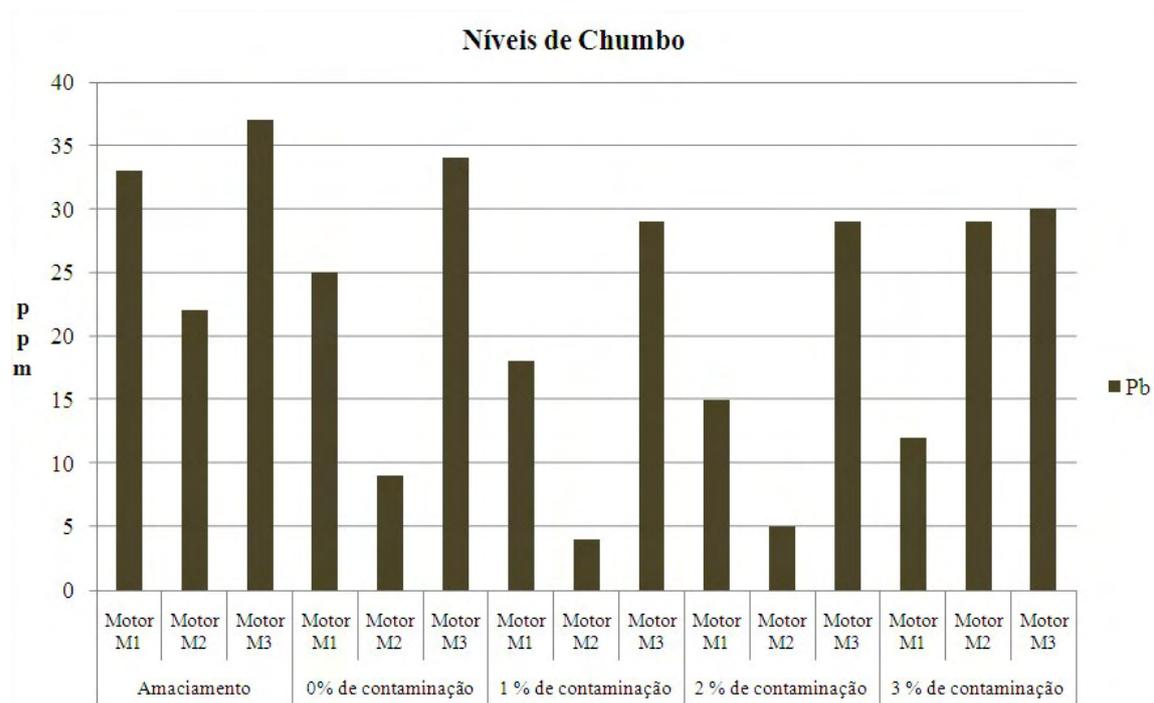
**Figura 6.17 – Níveis de Silício obtidas via Absorção Atômica.**



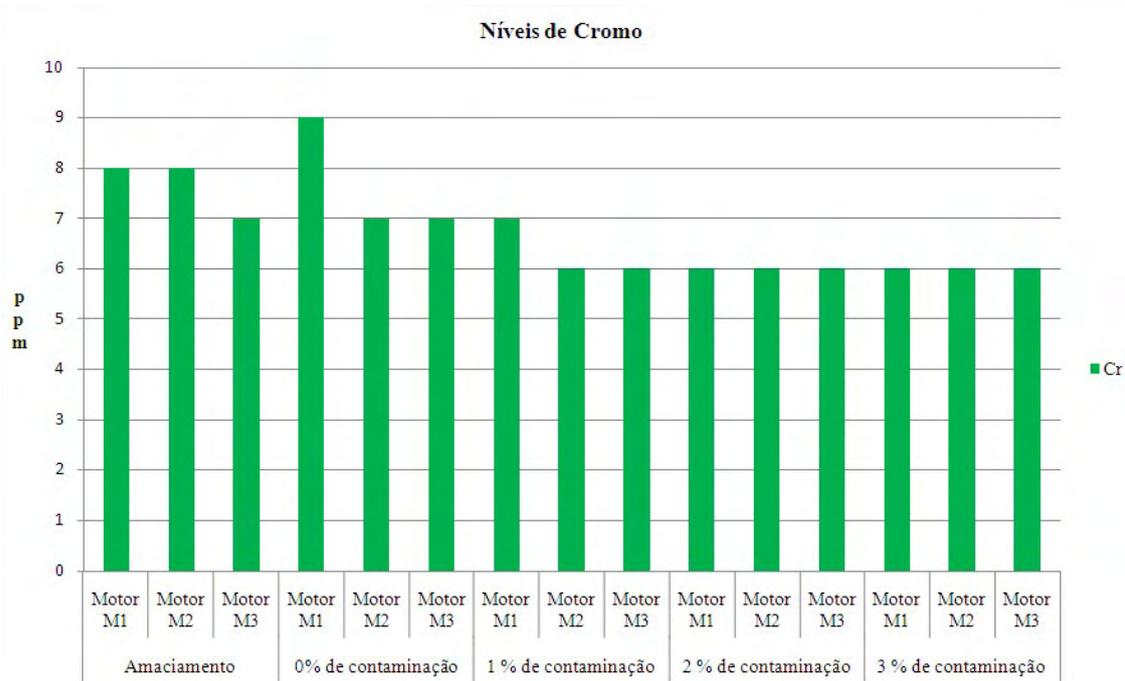
**Figura 6.18 – Níveis de Alumínio obtidas via Absorção Atômica.**



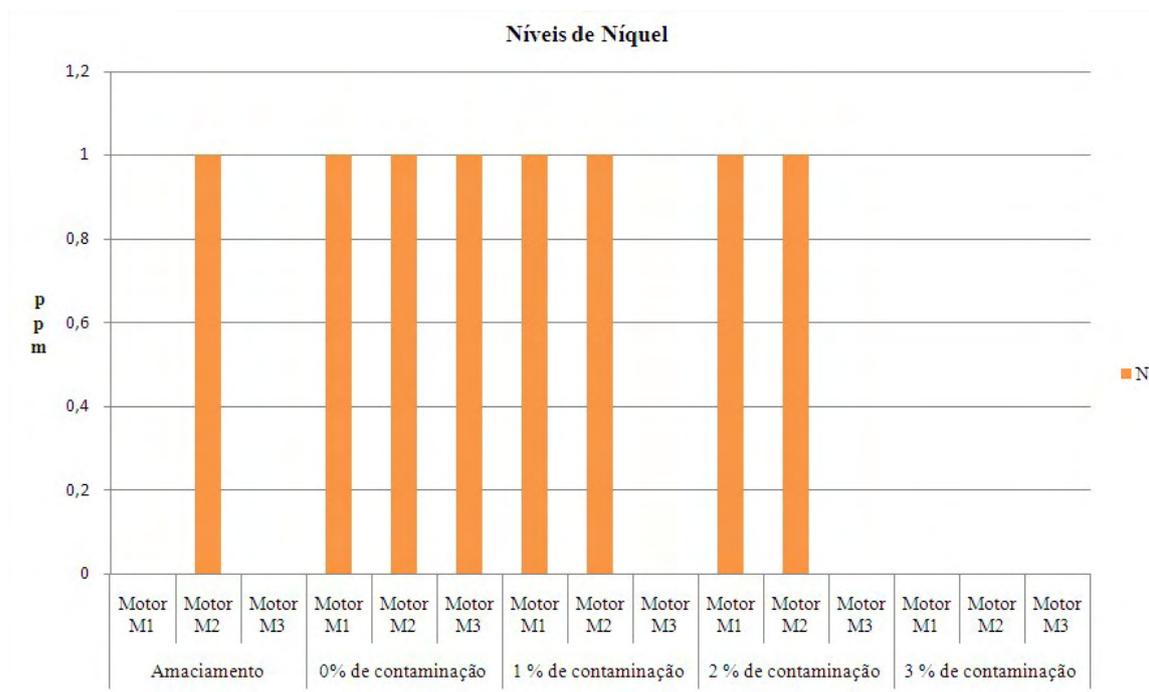
**Figura 6.19 – Níveis de Ferro obtidas via Absorção Atômica.**



**Figura 6.20 – Níveis de Chumbo obtidas via Absorção Atômica.**



**Figura 6.21 - Níveis de Cromo obtidas via Absorção Atômica.**



**Figura 6.22 – Níveis de Níquel obtidas via Absorção Atômica.**

Analisando a Tabela 6.1 e as Figuras 6.16 e 6.19 nota-se um maior desgaste, dos componentes com Fe e Cu nas suas composições, durante o período de amaciamento em relação aos demais períodos ensaiados.

### 6.3 – VISCOSIDADE CINEMÁTICA

A viscosidade de um lubrificante influi diretamente no desgaste dos componentes internos móveis de um motor. Um lubrificante com baixa viscosidade sofre com o aumento da temperatura a diminuição considerável de sua película de lubrificação agravando assim, o desgaste excessivo das peças.

Os resultados demonstrados na Tabela 6.2 foram obtidos seguindo a norma ASTM D445, utilizando-se portanto um viscosímetro cinemático de numero 350.

Tabela 6.2 – Viscosidades dos ensaios realizados.

Nível de contaminação por combustível	Motores	Viscosidade	Viscosidade
		cinemática a 40 °C (cSt)	cinemática a 100 °C (cSt)
<b>Amaciamento</b>	Motor M1 <sup>(1)</sup>	145,95	14,91
	Motor M2 <sup>(2)</sup>	150,74	14,79
	Motor M3 <sup>(3)</sup>	152,97	14,56
<b>0% de contaminação</b>	Motor M1 <sup>(1)</sup>	147,98	14,50
	Motor M2 <sup>(2)</sup>	147,07	15,32
	Motor M3 <sup>(3)</sup>	140,09	14,46
<b>1 % de contaminação</b>	Motor M1 <sup>(1)</sup>	138,29	13,80
	Motor M2 <sup>(2)</sup>	147,98	14,85
	Motor M3 <sup>(3)</sup>	122,81	14,40
<b>2 % de contaminação</b>	Motor M1 <sup>(1)</sup>	125,53	13,74
	Motor M2 <sup>(2)</sup>	147,72	14,36
	Motor M3 <sup>(3)</sup>	118,15	15,48
<b>3 % de contaminação</b>	Motor M1 <sup>(1)</sup>	115,90	13,40
	Motor M2 <sup>(2)</sup>	135,99	14,56
	Motor M3 <sup>(3)</sup>	107,18	12,75

Notas: <sup>(1)</sup> Motor operando com Biodiesel B100 de origem animal;

<sup>(2)</sup> Motor operando com Diesel comercial B3;

<sup>(3)</sup> Motor operando com Biodiesel B100 (90% origem vegetal, 10% animal).

A Figura 6.23 demonstra o comportamento das viscosidades dos lubrificantes utilizados em cada estágio de contaminação.

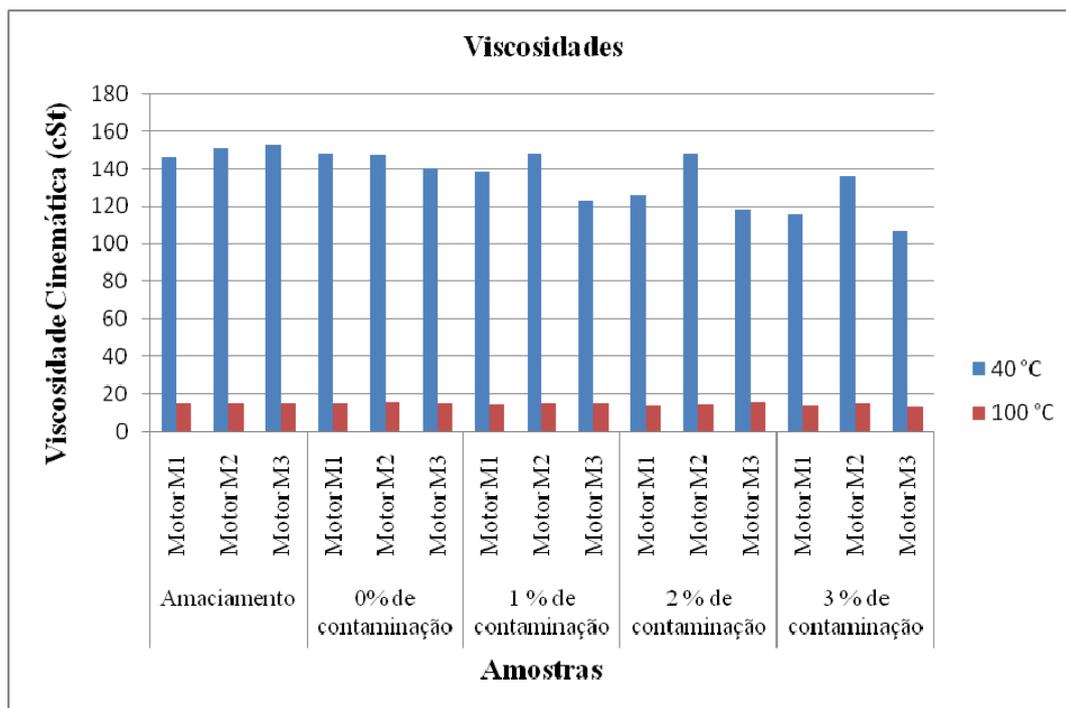


Figura 6.23 – Representação das viscosidades das amostras em 40 °C e 100 °C.

Se observarmos cada motor individualmente verifica-se que a viscosidade a 40 °C diminui com o aumento do teor de contaminação, redução esta, um pouco mais acentuada com o uso de Biodiesel.

#### 6.4 – TEOR DE ÁGUA

O teor de água é um dos ensaios mais importantes para a análise de um lubrificante. Um teor de água anormal pode indicar uma falha no sistema de arrefecimento dos motores indicando, assim uma possível fissura na estrutura do bloco do motor ou vazamentos pelos retentores. A água em porcentagens acima de 0,3% afeta prejudicialmente as propriedades de um óleo lubrificante, além disso, também promove a oxidação dos elementos internos do motor ocasionando um desgaste anormal das peças.

A Tabela 6.3 indica as porcentagens encontradas nas amostras coletadas em cada estagio dos testes, no qual, os valores encontrados são irrelevantes para prejudicar a qualidade do óleo lubrificante.

Tabela 6.3 – Teor de água encontrada nas amostras de óleo lubrificante dos motores.

<b>Estágio de contaminação do lubrificante</b>	<b>Motores</b>	<b>Teor de Água (%)</b>
<b>Amaciamento</b>	Motor M1 <sup>(1)</sup>	0
	Motor M2 <sup>(2)</sup>	0
	Motor M3 <sup>(3)</sup>	0
<b>0% de contaminação</b>	Motor M1 <sup>(1)</sup>	0,02
	Motor M2 <sup>(2)</sup>	0,01
	Motor M3 <sup>(3)</sup>	0
<b>1 % de contaminação</b>	Motor M1 <sup>(1)</sup>	0,01
	Motor M2 <sup>(2)</sup>	0,01
	Motor M3 <sup>(3)</sup>	0
<b>2 % de contaminação</b>	Motor M1 <sup>(1)</sup>	0,03
	Motor M2 <sup>(2)</sup>	0,01
	Motor M3 <sup>(3)</sup>	0
<b>3 % de contaminação</b>	Motor M1 <sup>(1)</sup>	0,04
	Motor M2 <sup>(2)</sup>	0,02
	Motor M3 <sup>(3)</sup>	0

Notas: <sup>(1)</sup> Motor operando com Biodiesel B100 de origem animal;

<sup>(2)</sup> Motor operando com Diesel comercial B3;

<sup>(3)</sup> Motor operando com Biodiesel B100 (90% origem vegetal, 10% animal).

Os valores apresentados são irrelevantes, podendo ser decorrentes de retiradas do lubrificante em dias de diferentes umidade relativa do ar, contaminação dos recipientes dos lubrificantes analisados ou até mesmo imprecisão na medição.

## 6.5 – PONTO DE FULGOR

O ponto de fulgor é utilizado para detectar uma possível contaminação do óleo lubrificante por combustível. No caso optou-se por obter os pontos de fulgor das amostras com os maiores níveis de contaminação, no entanto, como demonstrado na Tabela 6.4 a diferença não é tão expressiva a ponto de comprometer negativamente as propriedades do óleo lubrificante.

**Tabela 6.4 – Ponto de fulgor obtido das amostras com 3% de contaminação.**

<b>Grau contaminação lubrificante</b>	<b>Motor</b>	<b>Temperatura (° C)</b>
<b>3%</b>	Motor M1 <sup>(1)</sup>	214
	Motor M2 <sup>(2)</sup>	210
	Motor M3 <sup>(3)</sup>	208
<b>Novo</b>		215(medido), 262(catálogo)

Notas: <sup>(1)</sup> Motor operando com Biodiesel B100 de origem animal;

<sup>(2)</sup> Motor operando com Diesel comercial B3;

<sup>(3)</sup> Motor operando com Biodiesel B100 (90% origem vegetal, 10% animal).

Houve apenas uma ligeira diminuição do ponto de fulgor em relação ao lubrificante não contaminado em todos os motores analisados. Os valores são tão pequenos que não representam informações precisas devido à resolução do termômetro utilizado.

## 6.6 – MONITOR DE PARTÍCULAS FERROSAS (PQA)

O PQA (*Particle Quantifier Analysis*) é um equipamento que indica uma tendência de concentração das partículas magnéticas contida em uma amostra de óleo lubrificante. Através dessa análise é elaborado o gráfico de tendências, gráfico este importante para o acompanhamento dos níveis de desgaste sofridos pelo equipamento. Esta técnica atua como uma pré-análise da espectrografia por Absorção atômica, pois, indica preliminarmente alguma anormalidade dos níveis de metais magnéticos, níveis estes que posteriormente podem ser medidos quantitativamente pela Absorção Atômica. O índice PQ é um valor adimensional, no entanto quanto maior for esse número, maior é a concentração de partículas magnéticas contidas no óleo.

A Tabela 6.5 indica os níveis da concentração dos materiais magnéticos contidos nas amostras coletadas nos motores a cada estágio de contaminação.

Tabela 6.5 – Índice PQ das amostras dos motores.

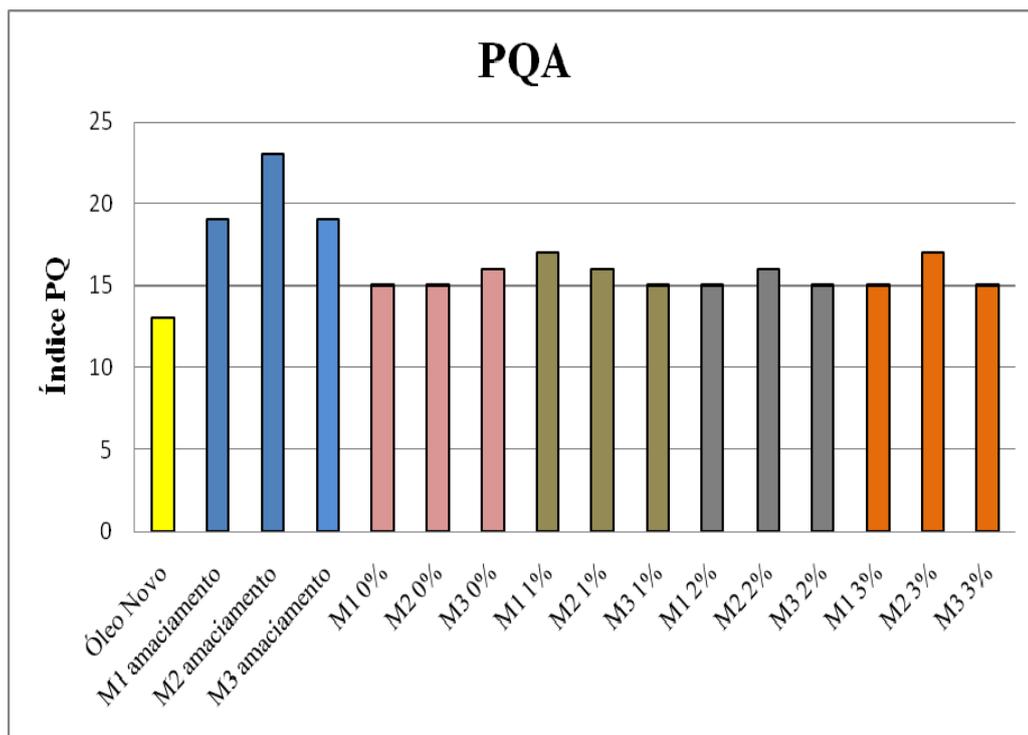
<b>Grau de contaminação do lubrificante</b>	<b>Motores</b>	<b>Índice PQ (média)</b>
<b>Amaciamento</b>	Motor M1 <sup>(1)</sup>	19
	Motor M2 <sup>(2)</sup>	23
	Motor M3 <sup>(3)</sup>	19
<b>0% de contaminação</b>	Motor M1 <sup>(1)</sup>	15
	Motor M2 <sup>(2)</sup>	15
	Motor M3 <sup>(3)</sup>	16
<b>1 % de contaminação</b>	Motor M1 <sup>(1)</sup>	17
	Motor M2 <sup>(2)</sup>	16
	Motor M3 <sup>(3)</sup>	15
<b>2 % de contaminação</b>	Motor M1 <sup>(1)</sup>	15
	Motor M2 <sup>(2)</sup>	16
	Motor M3 <sup>(3)</sup>	15
<b>3 % de contaminação</b>	Motor M1 <sup>(1)</sup>	15
	Motor M2 <sup>(2)</sup>	17
	Motor M3 <sup>(3)</sup>	15

Notas: <sup>(1)</sup> Motor operando com Biodiesel B100 de origem animal;

<sup>(2)</sup> Motor operando com Diesel comercial B3;

<sup>(3)</sup> Motor operando com Biodiesel B100 (90% origem vegetal, 10% animal).

A Figura 6.24 apresenta o comportamento dos níveis de metais magnéticos presentes nas amostras em cada nível de contaminação.

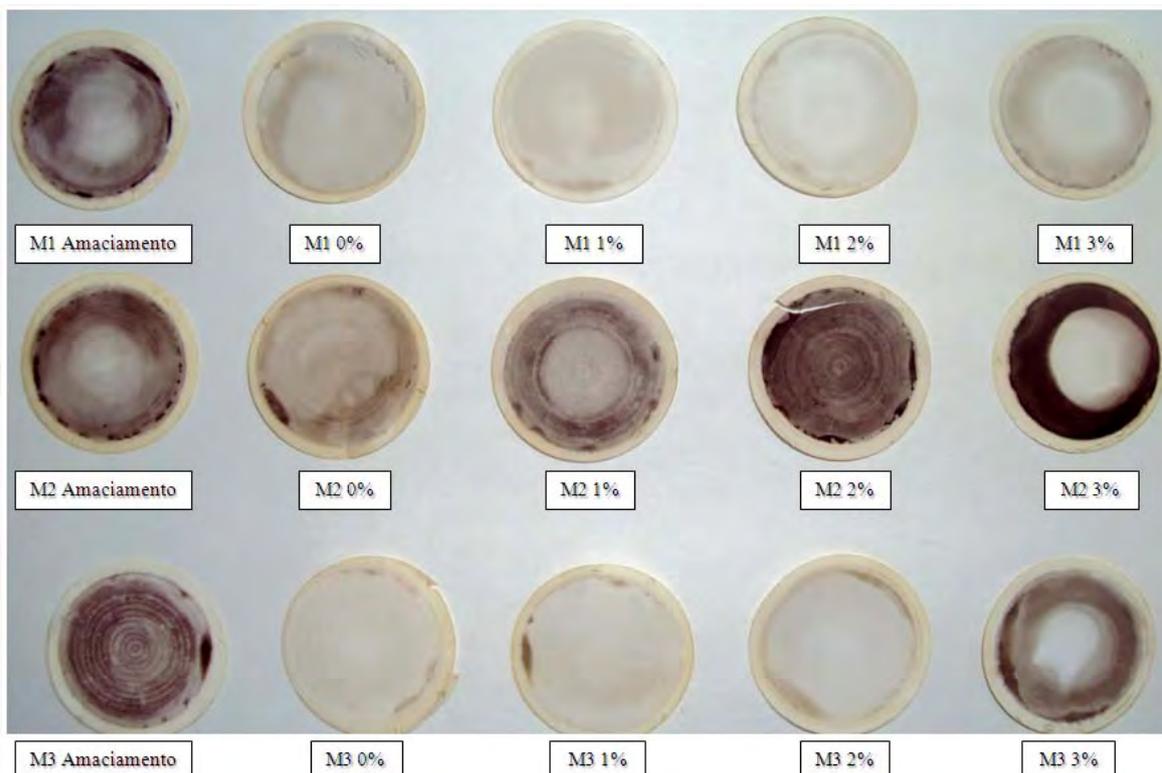


**Figura 6.24 – Gráfico comparativo do índice PQ para os motores utilizados.**

Nota-se uma presença maior de partículas magnéticas no período de amaciamento. Este comportamento é explicado pelo fato de as partes moveis ainda estarem sem o assentamento correto e ainda por possuírem um resíduo de material do processo de usinagem.

## **6.7 – FILTRAGEM POR MEMBRANA DE CELULOSE**

Visualmente, a Figura 6.25 indica as diferenças entre as membranas de filtragem dos óleos coletados nos motores em cada nível de contaminação.

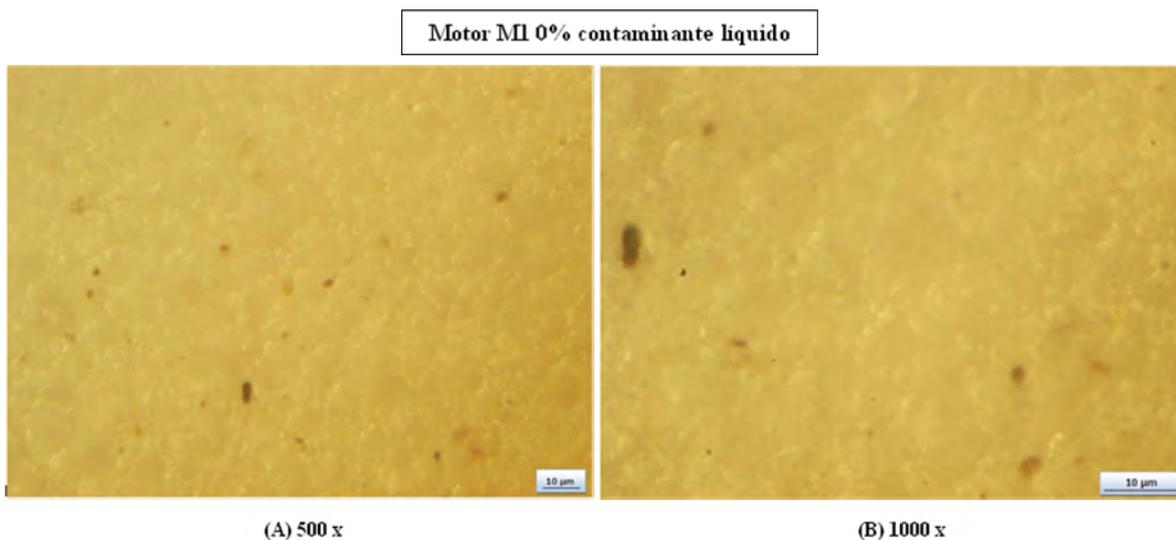


**Figura 6.25 – Comparativo visual das membranas de filtração.**

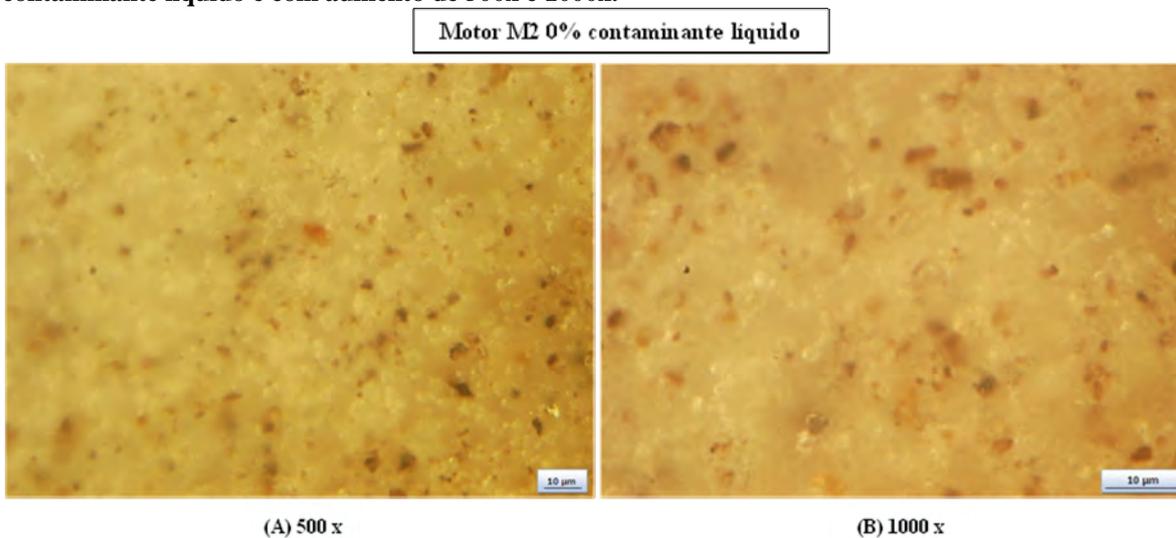
Pela Figura 6.25 observa-se que a utilização do Diesel comercial B3 formou maior quantidade de fuligem. Isto é melhor caracterizado através das membranas localizadas horizontalmente na linha do meio da figura, isto é, motor M2.

As Figuras 6.26 a 6.40 mostram as partículas obtidas das membranas de celulose e fotografadas em microscópio com um aumento de 500 e 1000 vezes em cada nível de contaminação.

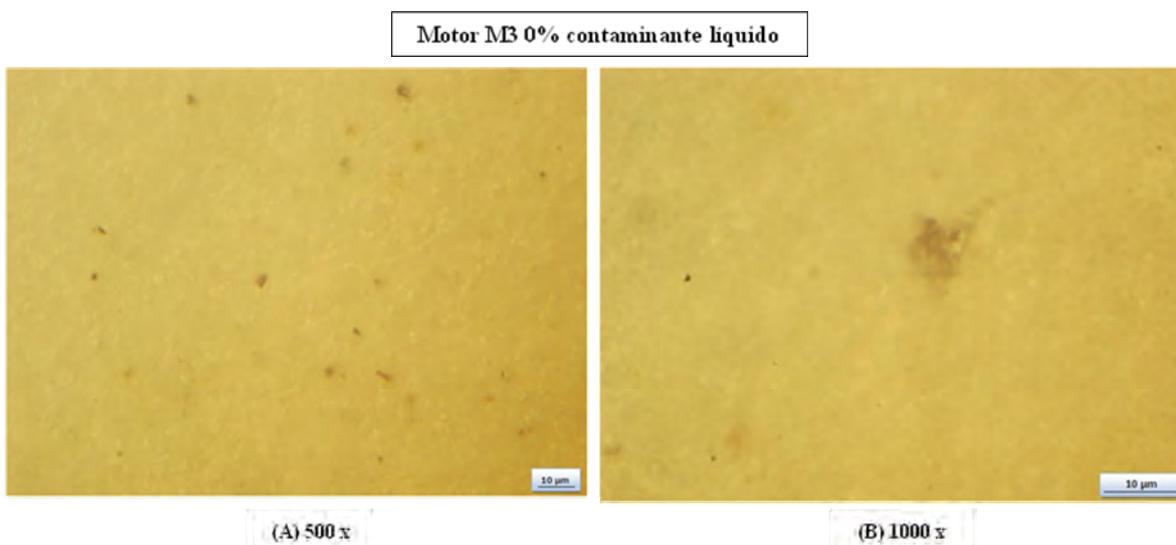




**Figura 6.29 - Partículas das membranas de celulose obtidas em microscópio do motor M1, livre de contaminante líquido e com aumento de 500x e 1000x.**



**Figura 6.30 – Partículas das membranas de celulose obtidas em microscópio do motor M2, livre de contaminante líquido e com aumento de 500x e 1000x.**



**Figura 6.31 – Partículas das membranas de celulose obtidas em microscópio do motor M3, livre de contaminante líquido e com aumento de 500x e 1000x.**

Motor M1 1% contaminante líquido

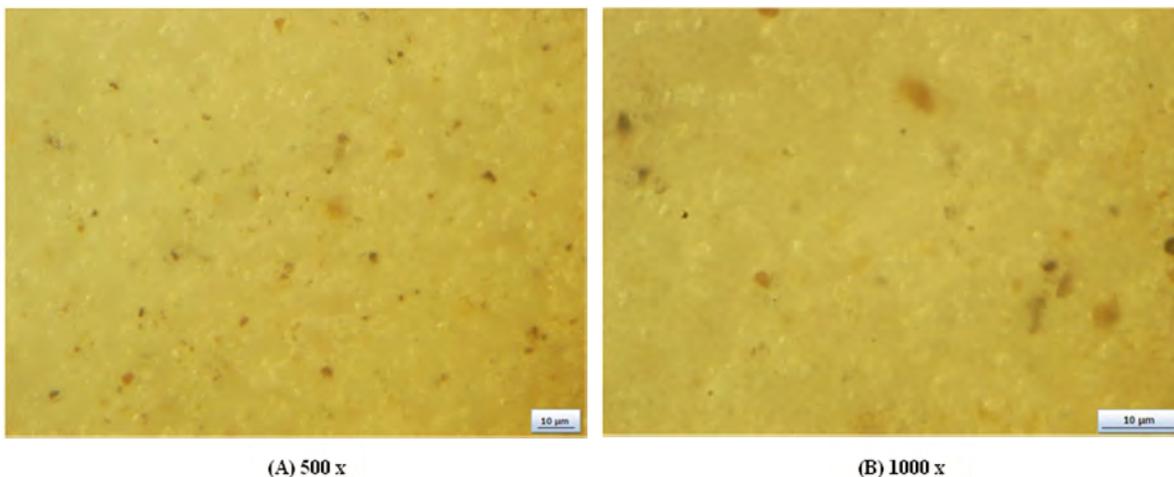


Figura 6.32 – Partículas das membranas de celulose obtidas em microscópio do motor M1, com 1% de contaminante líquido e com aumento de 500x e 1000x.

Motor M2 1% contaminante líquido

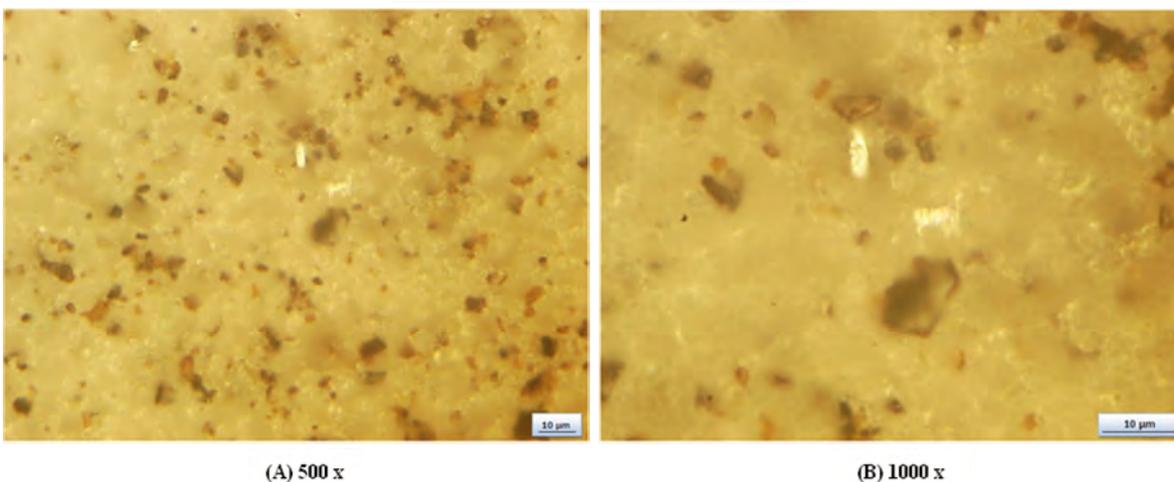


Figura 6.33 – Partículas das membranas de celulose obtidas em microscópio do motor M2, com 1% de contaminante líquido e com aumento de 500x e 1000x.

Motor M3 1% contaminante líquido

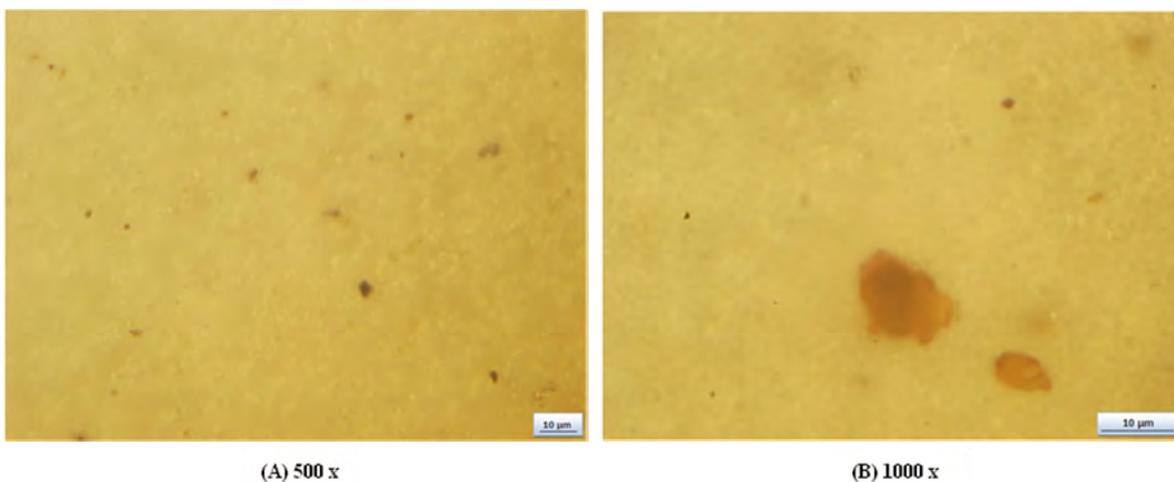
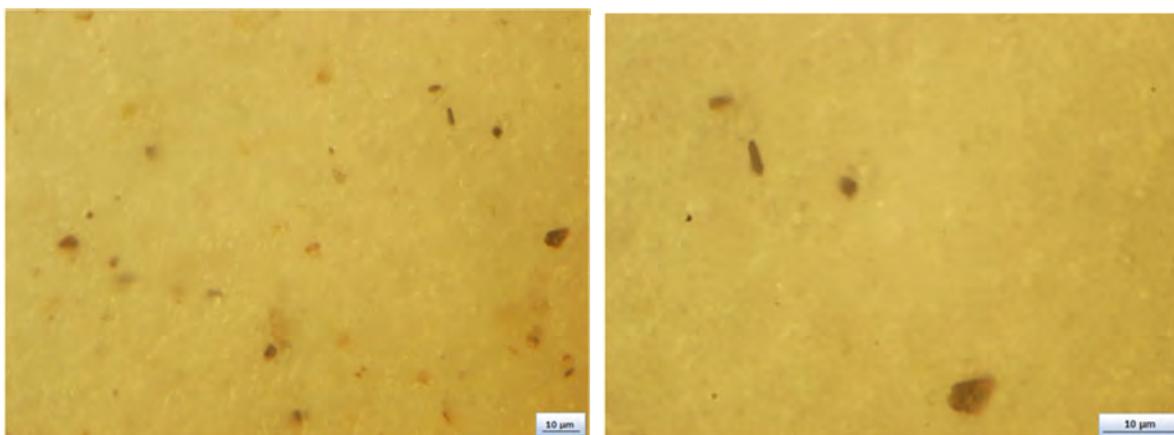


Figura 6.34 – Partículas das membranas de celulose obtidas em microscópio do motor M3, com 1% de contaminante líquido e com aumento de 500x e 1000x.

Motor M1 2% contaminante líquido

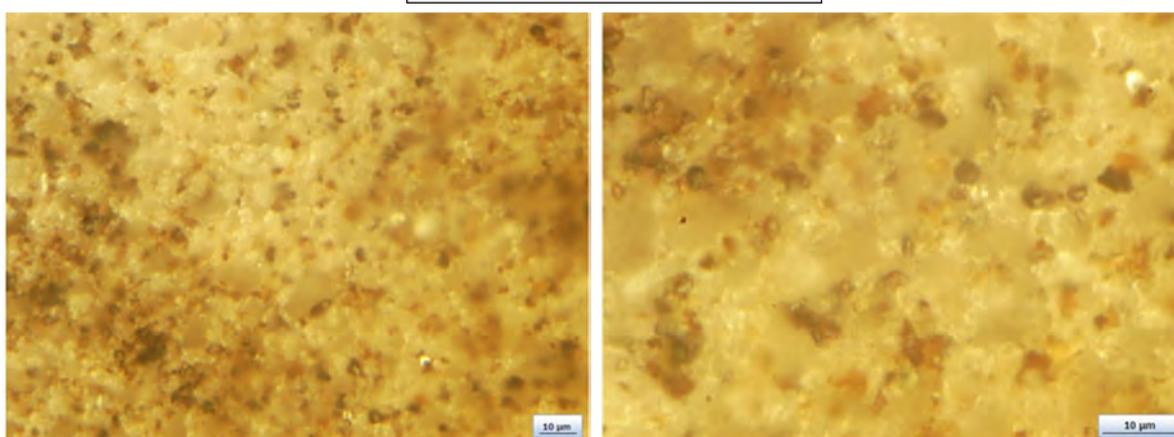


(A) 500 x

(B) 1000 x

Figura 6.35 – Partículas das membranas de celulose obtidas em microscópio do motor M1, com 2% de contaminante líquido e com aumento de 500x e 1000x.

Motor M2 2% contaminante líquido

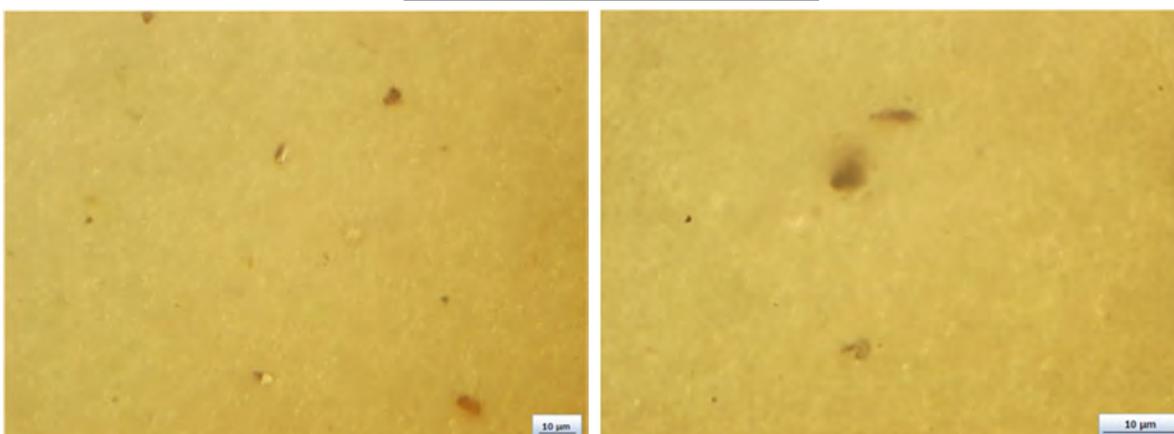


(A) 500 x

(B) 1000 x

Figura 6.36 – Partículas das membranas de celulose obtidas em microscópio do motor M2, com 2% de contaminante líquido e com aumento de 500x e 1000x.

Motor M3 2% contaminante líquido



(A) 500 x

(B) 1000 x

Figura 6.37 – Partículas das membranas de celulose obtidas em microscópio do motor M3, com 2% de contaminante líquido e com aumento de 500x e 1000x.

Motor M1 3% contaminante líquido

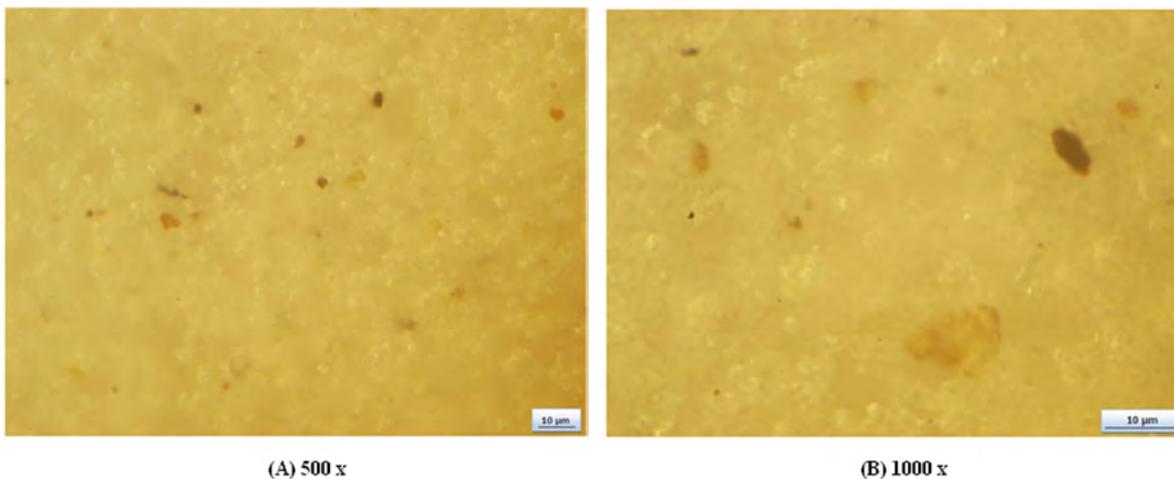


Figura 6.38 – Partículas das membranas de celulose obtidas em microscópio do motor M1, com 3% de contaminante líquido e com aumento de 500x e 1000x.

Motor M2 3% contaminante líquido

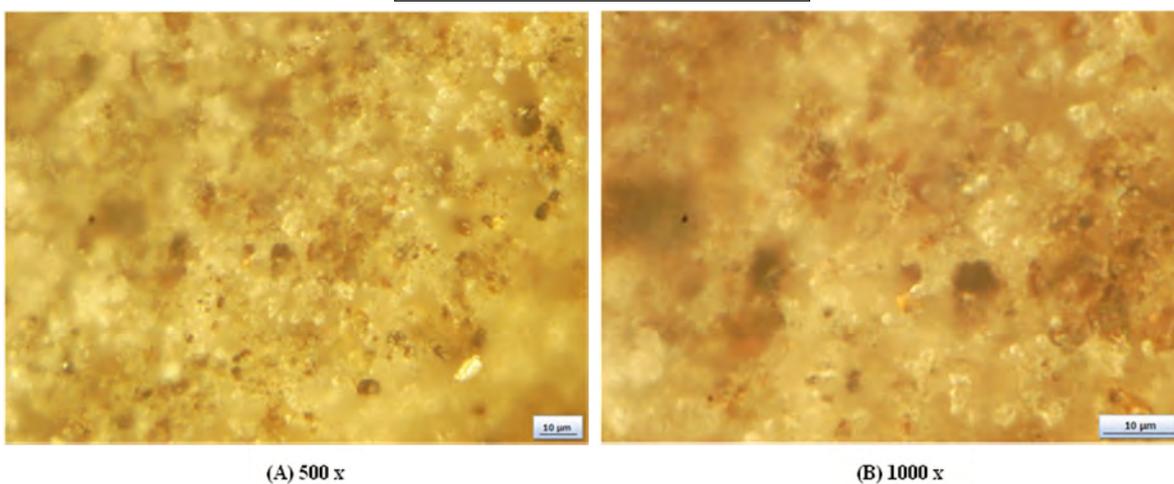


Figura 6.39 – Partículas das membranas de celulose obtidas em microscópio do motor M2, com 3% de contaminante líquido e com aumento de 500x e 1000x.

Motor M3 3% contaminante líquido

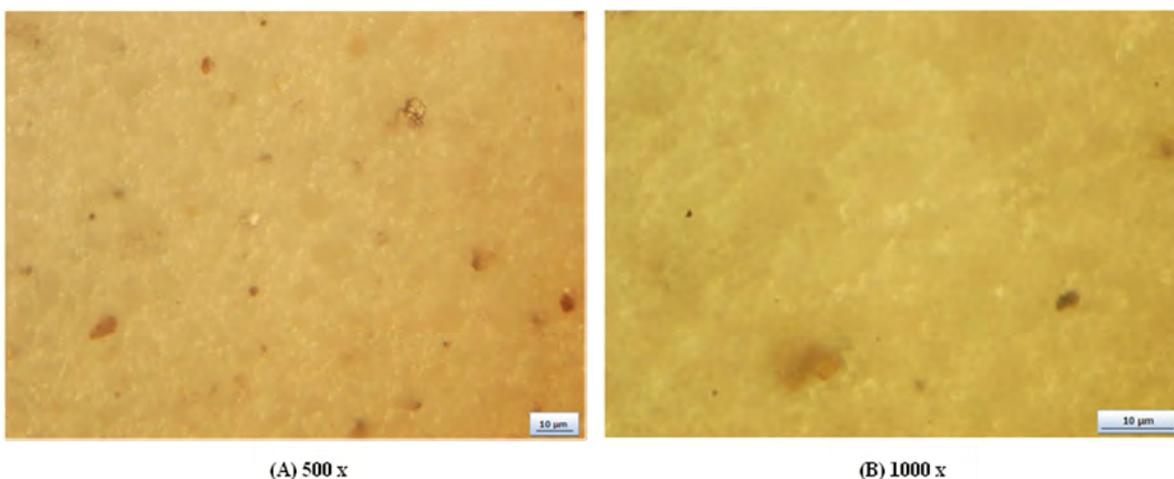


Figura 6.40 – Partículas das membranas de celulose obtidas em microscópio do motor M3, com 3% de contaminante líquido e com aumento de 500x e 1000x.

As Figuras 6.30, 6.33, 6.36 e 6.39 confirmam o fato apontado no comentário sobre a Figura 6.25, de que as membranas ensaiadas com os lubrificantes dos motores a Diesel comercial B3 apresentaram maior quantidade de fuligem.

Segundo Van Gerpen (2004) *apud* Silva (2006), o processo de combustão cujo resultado é a produção de partículas de fuligem é um dos maiores desafios dos projetistas. Tais partículas são formadas em regiões de alta temperatura na câmara de combustão, onde a razão ar/combustível é rica em combustível rico em carbono com pouca qualidade de hidrogênio e compostos inorgânicos. Com o uso do Biodiesel os níveis de fuligem produzida é reduzida, cuja causa esta associada a quantidade de oxigênio presente no combustível.

## **6.8 – CONTAGEM DE PARTÍCULAS ISO**

A contagem de partículas é uma técnica que auxilia na determinação da qualidade do óleo lubrificante, é empregada para verificar por meio de comparação visual a quantidade aproximada de partículas contidas em uma amostra de lubrificante. Para tal análise é utilizada imagem de uma membrana de filtragem fotografada em um microscópio óptico.

A Tabela 6.6 mostra a contagem de partículas realizadas nas amostras dos óleos lubrificantes utilizados pelos motores em cada estágio de contaminação. Como esperado, foi encontrado uma contagem de partículas maiores nos períodos de amaciamento nos três motores, validando assim, que nesse estagio ocorre uma liberação maior de elementos residuais do processo de produção de um motor.

É observado também na Tabela 6.6 que os valores obtidos particularmente nas amostras do período de amaciamento que a quantidade estipulada de particulados sólidos contidos no óleo é superior ao padrão adotado, sendo assim, foi adotado o índice NC- não classificado.

Tabela 6.6 – Contagem de partículas ISO das amostras coletadas nos motores.

<b>Grau de contaminação do lubrificante</b>	<b>Motores</b>	<b>ISO</b>
<b>Amaciamento</b>	Motor M1 <sup>(1)</sup>	N.C <sup>(4)</sup>
	Motor M2 <sup>(2)</sup>	N.C <sup>(4)</sup>
	Motor M3 <sup>(3)</sup>	N.C <sup>(4)</sup>
<b>0% de contaminação</b>	Motor M1 <sup>(1)</sup>	23/22/21
	Motor M2 <sup>(2)</sup>	22/21/20
	Motor M3 <sup>(3)</sup>	22/21/20
<b>1 % de contaminação</b>	Motor M1 <sup>(1)</sup>	23/22/21
	Motor M2 <sup>(2)</sup>	N.C <sup>(4)</sup>
	Motor M3 <sup>(3)</sup>	22/21/20
<b>2 % de contaminação</b>	Motor M1 <sup>(1)</sup>	N.C <sup>(4)</sup>
	Motor M2 <sup>(2)</sup>	N.C <sup>(4)</sup>
	Motor M3 <sup>(3)</sup>	22/21/20
<b>3 % de contaminação</b>	Motor M1 <sup>(1)</sup>	N.C <sup>(4)</sup>
	Motor M2 <sup>(2)</sup>	22/21/20
	Motor M3 <sup>(3)</sup>	22/21/20

Notas: <sup>(1)</sup> Motor operando com Biodiesel B100 de origem animal;

<sup>(2)</sup> Motor operando com Diesel comercial B3;

<sup>(3)</sup> Motor operando com Biodiesel B100 (90% origem vegetal, 10% animal);

<sup>(4)</sup> Não Classificado.

A fuligem de um lubrificante automotivo torna difícil a sua contagem. Aqui foram apresentados os valores obtidos, porém os mesmos não são precisos. Trata-se de uma técnica muito empregada em lubrificantes de componentes hidráulicos.

## 6.9 – NÚMERO DE BASICIDADE (TBN)

O número de basicidade total representa a quantidade de KOH/g para neutralizar 1 grama de óleo. Esta análise é importante para neutralizar os produtos ácidos resultantes da combustão do combustível. É recomendado o uso de um óleo até que o seu valor TBN reduza à metade do valor do TBN do óleo lubrificante novo. A maioria dos óleos lubrificantes novos possui o TBN com valor em média de 12 mgKOH/g.

A Tabela 6.7 mostra os valores obtidos do TBN das amostras.

**Tabela 6.7 – Número de Basicidade das amostras de óleo lubrificante.**

<b>Grau de contaminação do lubrificante</b>	<b>Motores</b>	<b>TBN</b>
<b>Amaciamento</b>	Motor M1 <sup>(1)</sup>	12,34
	Motor M2 <sup>(2)</sup>	13,07
	Motor M3 <sup>(3)</sup>	11,98
<b>0% de contaminação</b>	Motor M1 <sup>(1)</sup>	12,38
	Motor M2 <sup>(2)</sup>	12,95
	Motor M3 <sup>(3)</sup>	13,44
<b>1 % de contaminação</b>	Motor M1 <sup>(1)</sup>	13,55
	Motor M2 <sup>(2)</sup>	13,10
	Motor M3 <sup>(3)</sup>	12,55
<b>2 % de contaminação</b>	Motor M1 <sup>(1)</sup>	13,50
	Motor M2 <sup>(2)</sup>	13,53
	Motor M3 <sup>(3)</sup>	9,77
<b>3 % de contaminação</b>	Motor M1 <sup>(1)</sup>	12,98
	Motor M2 <sup>(2)</sup>	13,41
	Motor M3 <sup>(3)</sup>	13,20

Notas: <sup>(1)</sup> Motor operando com Biodiesel B100 de origem animal;

<sup>(2)</sup> Motor operando com Diesel comercial B3;

<sup>(3)</sup> Motor operando com Biodiesel B100 (90% origem vegetal, 10% animal).

Pela tabela acima, constata-se que os valores obtidos não indicam nenhum tipo de alteração nas propriedades de neutralização desse lubrificante.

## 6.10 – CONSUMO MÉDIO DE COMBUSTÍVEL

O consumo médio de combustível foi monitorado durante os ensaios, a Tabela 6.8 demonstra os resultados obtidos. Vale ressaltar que tais resultados foram calculados com os motores a 3.000 rpm  $\pm$  100 rpm levando em consideração o período total de ensaios realizados por cada motor.

**Tabela 6.8 – Consumo médio de combustível.**

<b>Motor</b>	<b>Consumo médio (l/h)</b>
Motor M1 <sup>(1)</sup>	0,52
Motor M2 <sup>(2)</sup>	0,48
Motor M3 <sup>(3)</sup>	0,53

Notas: <sup>(1)</sup> Motor operando com Biodiesel B100 de origem animal;

<sup>(2)</sup> Motor operando com Diesel comercial B3;

<sup>(3)</sup> Motor operando com Biodiesel B100 (90% origem vegetal, 10% animal).

Para o fato de um acoplamento de carga aos motores, seus consumos serão obviamente alterados, sendo assim, em um estágio posterior ao estudo atual, essa análise comparativa poderá ser melhor observada para a obtenção dos consumos médios combustíveis.

## 7 – CONCLUSÕES

Em relação aos ensaios feitos pode-se concluir que as imagens obtidas na ferrografia analítica indicaram que as partículas de desgaste possuem dimensões e morfologias normais para o regime de trabalho adotado. As dimensões em sua maioria não ultrapassaram 10  $\mu\text{m}$ , tamanhos estes considerados como um desgaste normal.

Os valores encontrados através da absorção atômica indicam a presença normal dentre os valores obtidos dos elementos. A avaliação para determinar se os níveis de partículas encontrados estão dentro da normalidade baseiam-se no monitoramento contínuo do equipamento. Uma alteração brusca nas quantidades dos elementos presentes no óleo podem indicar uma falha ou uma possível interferência externa (desalinhamento, desbalanceamento, sobrecarga) sobre o equipamento.

Em relação à viscosidade, os valores obtidos indicam que uma contaminação com o Biodiesel B100 afetam de maneira considerável, quando comparados com a contaminação com o Diesel comercial. Esta alteração foi maior observada para o lubrificante do motor com os níveis de 3% de contaminação.

Os valores da viscosidade dos lubrificantes analisados também diminuíram com o teor de contaminação líquida para os lubrificantes contaminados com Diesel comercial. A diminuição foi pequena, porém confirma a necessidade de se monitorar a viscosidade de um lubrificante automotivo em um programa de manutenção preditiva. Caso uma diminuição da viscosidade aconteça em um monitoramento contínuo e periódico, pode ser um indicativo de contaminação do lubrificante pelo combustível utilizado e, se em quantidades anormais, apontar para uma intervenção no motor.

Também se conclui que, se for analisado apenas uma técnica de manutenção preditiva em separado, pode-se incorrer em erros. E se analisado apenas as membranas celulósicas, por exemplo, seria deduzido que o motor M2 apresentou maior desgaste, pois as membranas relativas a este motor estavam mais sujas. Observando estas membranas juntamente com os resultados PQA e valores de absorção atômica combinados, concluí-se que estas “sujeiras” não são sinônimas de desgastes e sim de fuligem, pois os valores dos metais presentes na absorção atômica e os valores obtidos nos ensaios PQA não foram maiores, para o motor M2, considerando o mesmo nível de contaminação do lubrificante pelo combustível.

Analisando os valores obtidos via PQA, observa-se que os níveis mantiveram-se superiores nos períodos de amaciamento e com posterior decréscimo e estabilização nos

demais estágios do teste para cada nível de contaminação. O lubrificante Novo foi o que apresentou o menor valor PQA.

A visualização das membranas via microscópio óptico demonstra que com o uso do Diesel comercial o nível de particulados e fuligem aumentou substancialmente, comprovando assim o aumento da emissão de fuligem e emissão de carbono que se traduz em vantagens ambientais para a utilização do biodiesel.

Os valores de TBN obtidos indicam que as amostras de óleos lubrificantes analisadas continuavam a apresentar sua capacidade de neutralizar os ácidos resultantes da combustão nas condições de operação dos ensaios.

## 8 – CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho foi discutido, de maneira sucinta, o conceito de manutenção e foi feita uma pequena revisão sobre Biodiesel, destacando suas fontes de matéria-prima e processos de produção. Também foi abordado o estudo de motores de combustão interna com ignição por ciclo Diesel, assim como discutido o conceito dos lubrificantes para motores.

Dando continuidade ao projeto global, os motores passarão a operar com Biodiesel de outras fontes de matéria-prima. Também serão temas de estudo motores operando com regimes de trabalhos reais, ou seja, trabalhando com algum carregamento, simulando uma operação de trabalho normal.

Resumidamente, como sugestões podem ser listadas situações de trabalho para os motores como:

- ✓ Utilização dos motores “sem carga” com misturas de B50 de origem animal e vegetal;
- ✓ Acoplamento do motor a um gerador de energia elétrica, comparando os níveis de produção de energia de acordo com o combustível utilizado e verificando as propriedades físico-químicas do óleo lubrificante;
- ✓ Simulação de uma contaminação por água nos motores;
- ✓ Operação dos motores com lubrificante fora das especificações recomendadas pelo fabricante.

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO. GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Biodiesel**. Disponível em: [www.anp.gov.br/biocombustiveis/biodiesel.asp](http://www.anp.gov.br/biocombustiveis/biodiesel.asp). Acesso em: 12 dez. 2009.

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

BARNES, M. Viscosity-how it is measured and reported. **Practicing Oil Analysis**, p. 46-50, 2002.

BORIN, A. **Aplicação de quimioterapia e espectroscopia no infravermelho no controle de qualidade de lubrificantes**. 2003. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

CANAKCI, M. van; GERPEN, J. H. Comparison of engine performance and emissions for petroleum diesel fuel, yellow grease biodiesel, and soybean oil biodiesel. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.46, p.927-944, 2003.

CHALLEN, B.; BARANESCU, R. **Diesel engine reference book**. 2.ed. Oxford: Butterworth – Heinemann, 1999.

CORRÊA, I. M. et al. Desempenho de motor diesel com misturas de biodiesel de óleo de girassol. **Ciencia Agrotecnologia**, Lavras, v32, p. 923-928. 2008

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**. Disponível em: [http://dabdoublabs.com.br/Sintese\\_projeto.htm](http://dabdoublabs.com.br/Sintese_projeto.htm)>. Acesso em: 17 ago. 2008.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Matérias-primas para a produção do biodiesel: priorizando as alternativas**. Disponível em: <http://www.embrapa.gov.br/imprensa/palestras/PalestraDiretoPresidenteProducaoBiodiesel.pdf> . Acesso em: 20 jan. 2009.

FARIA, H. F. **A política pública de inserção do biodiesel na matriz energética brasileira seus reflexos sócio-ambiental e econômico.** 2008. Disponível em: <<http://www.diritto.it/archivio/1/25063.pdf>>. Acesso em: 08 jan. 2009.

FERREIRA, A. B. **Novo dicionário da língua portuguesa.** Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1975.

FITHC, J. The agony of diesel engine oil particle counts. **Practing oil analysis.** March-april, p.2-5, 2005.

FYGUERO, A.; SIMÓN, J. **Mantenimiento de motores diesel:** consejo de estudios de postgrado. Mérida: Universidad de Los Andes, 1997.

GEAHC, A.L. An automated approach to measuring fuel dilution in used engine oil. In: **CONDITION MONITORING, INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONDITION MONITORING,** 1994, Swansea. **Proceeding of the...** Swansea: University of Wales, 1994. p.532-542.

GOLDEMBERG, J. **Energia para o desenvolvimento econômico.** São Paulo: T.A. Queiroz, 1988.

GRANJA, L. A. Ferrografia e Espectrometria aplicadas a manutenção preditiva de turbocompressores. **Boletim Técnico da Petrobrás,** Rio de Janeiro, v.42, n.1/4, p.52-63, 1999.

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

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Indicadores agropecuária.** disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/agropecuaria/lspa/defaulttab.shtm>

JULIATO, A. **Análise da influência de diferentes misturas de biodiesel no desempenho e emissões de poluentes de um motor diesel agrícola.** 2006. 159 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

KITTIWAKE. **Manual PQA.** Disponível em: [http://www.kittiwake.com/wear\\_debris\\_monitors.htm](http://www.kittiwake.com/wear_debris_monitors.htm). Acesso em: 20 jul. 2009.

KNOTHE, G. et al. **Manual do biodiesel**. Curitiba: Edgard Blucher, 2006.

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

LANTOS, F.; LANTOS, J.; LANTOS, E. **An unusual twist to the blotter test: the Lantos method**". Practicing Oil Analysis Magazine. July 2002

LOCKWOOD, F. E.; DALLEY R. Lubricant analysis. In: HENRY, S. D. et al. **ASM handbook: friction, lubrication, and wear technology**. Metals Park: The Materials Information Society, 1992. v.18, p.299-312.

LUBRIFICANTES. O significado das siglas. **Guia de frota e companhia**. 9.ed. Disponível em: [http://www.digitalflip.com.br/frotacia/flip/guia\\_lubrificantes/2007%3D01-01-2007/09.pdf](http://www.digitalflip.com.br/frotacia/flip/guia_lubrificantes/2007%3D01-01-2007/09.pdf). Acesso em: 21 ago. 2009.

MALPICA, L. G. **Manutenção preditiva de motores de combustão interna, à gasolina, através da técnica de análise de lubrificantes**. 2007. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2007.

MATTEI, L. F. **Programa nacional para a produção de biodiesel no Brasil (PNPB): trajetória, situação atual e desafios**. Disponível em: <[www.sober.org.br/palestra/9/79.pdf](http://www.sober.org.br/palestra/9/79.pdf)>. Acesso em: 05 fev. 2009.

MB DO BRASIL. **O Biodiesel**. Mb do Brasil- consultoria em biocombustíveis. Disponível em: <<http://mbdobrasil.com.br/modules.php?name=Content&pa=showpage&pid=8>>. Acesso em: 22 jan. 2009.

MECHANICAL SCIENCE. **Diesel engine fundamentals**. Washington: U.S. Department Energy, 1993. 2v.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Resolução nº 2. 2008**. Disponível em: <[http://www.mme.gov.br/mme/galerias/arquivos/conselhos\\_comite/CNPE/resolucao\\_2008/Resolucao02.pdf](http://www.mme.gov.br/mme/galerias/arquivos/conselhos_comite/CNPE/resolucao_2008/Resolucao02.pdf)>. Acesso em: 10 out. 2008.

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

MYSHKIN, N.K.; KONG, H.; GRIGOIEV, A. Y.; YONN, E. S. The use of color in wear debris analysis. **WEAR**, Lausanne, v.251, p.1218-1226, 2001.

MONCHY, F. **A função da manutenção: formação para a eficiência da manutenção industrial**. São Paulo: Durban, 1989.

MOUSA, M. **Monitoring the wear of internal combustion engines**. El-Minia: Faculty of Engineering, El-Minia University, 2006. (PN 61111 - Industrial Production e Mechanical Technology, 2006).

MORAES, M. S. A. **Biodiesel de sebo: avaliação de propriedades e testes de consumo em motor a diesel**. 2008. 118 f. Dissertação (Mestrado em Química) - Instituto de Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

MOURA, C. R.; CARRETEIRO, R. P. **Lubrificantes e lubrificação**. Rio de Janeiro: Livros técnicos e Científicos, 1978. v.1.

NEWELL, G. E. **Oil analysis cost-effective machine condition monitoring technique**. 51.ed. Wolverhampton: Industrial Lubrication and Tribology, 1999. p. 119-124.

OBERT, E. F. **Motores de combustão interna**. 2 ed. Porto Alegre: Globo, 1971.

PARENTE, J. E. **Biodiesel: uma aventura tecnológica num país engraçado**. Fortaleza: TECBIO, 2003.

PENIDO FILHO, P. **Os motores de combustão interna**. Belo Horizonte: Hemi, 1983.

PENTEADO, R. A. N.; CUNHA, R. B. C.; PENTEADO, A. P. Biodiesel: uma sinopse das conjunturas brasileiras e mundial. In: CONGRESSO DA REDE BRASILEIRA DE TECNOLOGIA DE BIODIESEL, 2, 2007, Brasília. **Anais...** Brasília, DF: MCT, 2007.

PETROBRÁS. **Lubrificantes: fundamentos e aplicações**. Rio de Janeiro: Petrobras. 1999.

PLUNLEY, A. **Lubricant oil consumption effect on diesel exhaust ash emission using a sulfur dioxide tracer technique and thermogravimetry**. 1998. 131 f. Master (Science in Naval Architecture and Marine Engineering) - US Coast Guard Academy, 1998.

RAADNUIS, S. Machinery health monitoring through low cost maintenance tribology techniques. **The Journal of KMITNB**, New York, v.15, n.2, Apr-Jun, 2005.

ROYLANCE, B.J.; HUNT, T. M. **Wear debris analysis**. Oxford: Coxmoor publishing company, 1999.

SEBRAE. **Cartilha biodiesel**. Disponível em: <[www.biodieselbr.gov.br/docs/Cartilha\\_Sebrae.pdf](http://www.biodieselbr.gov.br/docs/Cartilha_Sebrae.pdf)>. Acesso em: 23 jul. 2008.

SHUMACHER, L. G. et al. Engine oil analysis of diesel engines fueled with 0, 1, 2, 100 percent Biodiesel. In: ANNUAL INTERNATIONAL MEETING ASAE, 2000, Milwaukee. **Proceedings of the...** Milwaukee: Midwest Express Center, 2000.

SILVA, M. V. **Efeitos do uso do Biodiesel sobre propriedades do óleo lubrificante de um motor de ignição por compressão**. 2006. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

SILVA JÚNIOR, A. I.; CASELLA, R. J. ; BIDART, M. A. F. **Absorção atômica**. Rio de Janeiro: Universidade Estadual do Rio de Janeiro, 2006. (Apostila de espectrofotometria de absorção atômica).

TAYLOR, C. F. **Análise dos motores de combustão interna**. São Paulo: Edgard Blucher, 1988. 2v.

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

TOMS, L. A. **Machinery oil analysis: methods, automation e benefits**. 2.ed. Virginia Beach: Coastal Skills Training, 1998.

VAHAOJA, P. **Oil analysis in machine diagnostics Faculty of Science**. Oulu: Department of Chemistry, University of Oulu, University of Oulu, Finland, Department of Mechanical Engineering, University of Oulu, University of Oulu, Finland, 2006.

VIANA, L. P. **Técnicas de manutenção**. In: SEMINÁRIO DE MANUTENÇÃO, 3, 1991, Curitiba. **Anais...** Curitiba: ABRAMAN, 1991. p.4. 1991. (Trabalhos técnicos- seção regional VII - Paraná e Santa Catarina.).

WANG, S.S. Engine oil condition sensor: method for establishing correlation with total acid number. **Sensor and Actuators**, Lausanne, v.B86, p.122-126, 2002.