

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROJETO DE GRADUAÇÃO**

**DIMENSIONAMENTO DE QUEIMADOR DE ÓLEO
LUBRIFICANTE USADO**

**GUILHERME CARVALHO SILVA
MOISÉS GREGÓRIO OLIVEIRA**

VITÓRIA – ES
MARÇO/2005

GUILHERME CARVALHO SILVA
MOISÉS GREGÓRIO OLIVEIRA

DIMENSIONAMENTO DE QUEIMADOR DE ÓLEO
LUBRIFICANTE USADO

Parte manuscrita do Projeto de Graduação dos alunos Guilherme Carvalho Silva e Moisés Gregório Oliveira, apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, para obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

**VITÓRIA – ES
MARÇO/2005**

**GUILHERME CARVALHO SILVA
MOISÉS GREGÓRIO OLIVEIRA**

**DIMENSIONAMENTO DE QUEIMADOR DE ÓLEO
LUBRIFICANTE USADO**

COMISSÃO EXAMINADORA:

**Prof. Sérgio Leite Lopes, M.Sc.
Orientador**

**Prof. Rogério Ramos, D.Sc.
Examinador**

**Prof. Elias Antônio Dalvi, M.Sc.
Examinador**

DEDICATÓRIA

Aos alunos do Curso de Engenharia Mecânica da UFES.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Professor Sérgio Leite Lopes por ter proposto esse projeto. Aos Professores Elias Antônio Dalvi e Rogério Ramos pela colaboração em vários estágios desse trabalho. Aos nossos pais e irmãos por acreditarem na realização deste sonho. Aos demais familiares e amigos pelo incentivo.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Secador de Café.	9
Figura 2 - Utilização da madeira como combustível na secagem do café.....	10
Figura 3 - Montagem da Experiência de Densidade.....	17
Figura 4 - Gráfico comparativo da Densidade dos óleos.....	18
Figura 5 - Representação esquemática dos viscosímetros rotativos: (a) disco, (b) cone-disco e (c) cilindro.....	21
Figura 6 - Representação esquemática do viscosímetro (a) Capilar e de (b) Stokes.....	22
Figura 7 - Representação esquemática do Viscosímetro de Saybolt.	24
Figura 8 - Representação Esquemática do Método de Saybolt utilizando as temperaturas padrão.	24
Figura 9 - Representação esquemática dos tubos universal e furol utilizados pelo método de Saybolt.	25
Figura 10 - Representação esquemática do Viscosímetro Rewood.....	25
Figura 11 - Representação esquemática do Viscosímetro Engler.	26
Figura 12 - Representação das etapas de medição no Viscosímetro Cinemático.....	27
Figura 13 - Viscosímetro de Höppler.	28
Figura 14 - (a) Representação esquemática do ensaio, (b) Montagem do ensaio, (c) Esferas utilizadas.....	28
Figura 15 - Rheo-Viscosímetro.	30
Figura 16 - Banho termostático.	33
Figura 17 - Cubetas.....	34
Figura 18 - (a) Braço de alavanca graduado, (b) Vareta porta-esfera.	34
Figura 19 - Gráfico da Viscosidade Dinâmica x Temperatura.	42
Figura 20 - Gráfico da Viscosidade Cinemática x Temperatura.	42
Figura 21 - Calorímetro.	46
Figura 22 - Adequação do local para o Calorímetro.....	49
Figura 23 - Fixação do cilindro de oxigênio.....	49
Figura 24 - Cadinho reformado.	50
Figura 25 - Abastecimento da camisa isolante do calorímetro.....	50
Figura 26 - Banho Calorimétrico.	51
Figura 27 - Estrutura interna da bomba calorimétrica.	51

Figura 28 - Água destilada para saturação.....	52
Figura 29 - Seqüência de preparação da amostra de ácido benzóico.	52
Figura 30 - (a) Amostra pronta para queima, (b) Bomba fechada.	53
Figura 31 - Introdução de Oxigênio.....	53
Figura 32 - Bomba no interior do banho calorimétrico.	54
Figura 33 - Painel do Calorímetro.	54
Figura 34 - Curva Calorimétrica.....	55
Figura 35 - Curva característica da queima do ác. benzóico.	57
Figura 36 - Curva característica da queima da amostra 6 do ác. benzóico.....	59
Figura 37 - (a) Grafite na forma de bastão, (b) Grafite em pó.....	60
Figura 38 - Curvas características da queima dos óleos (a) Usado, (b) Novo.....	62
Figura 39 - Representação esquemática de ponto de fulgor com método COC.....	65
Figura 40 - (a) Superfície Lisa, (b) Imã.....	67
Figura 41 - Filtragem do óleo usado.....	68
Figura 42 - Absorção do óleo durante filtragem.....	68
Figura 43 - Representação esquemática do atomizador.	70
Figura 44 - Gráfico $df \times mf$	76
Figura 45 - Gráfico $MMD \times mf$	76
Figura 46 - Gráfico $MMD \times Tf$ para algumas vazões de combustível.	77
Figura 47 - Gráfico $df \times Tf$ para algumas vazões de combustível.....	77
Figura 48 - Gráfico $MMD \times T_{o,ar}$ para algumas vazões de combustível.	78
Figura 49 - Gráfico $df \times T_{o,ar}$ para algumas vazões de combustível.....	78
Figura 50 - Gráfico $MMD \times ratm$ para algumas vazões de combustível.....	79
Figura 51 - Gráfico $df \times ratm$ para algumas vazões de combustível.	79
Figura 52 - Atomizador Dimensionado em milímetros.....	80

LISTA DE TABELA

Tabela 1 - Resultado Comparativo da Densidade dos óleos.....	18
Tabela 2 - Viscosidade do óleo novo à 22°C pelo Método da Proveta.	29
Tabela 3 - Resultados da viscosidade dos óleos padrões à 40°C.....	32
Tabela 4 - Escolha da cubeta para medição de viscosidade.	33
Tabela 5 - Medição de viscosidade do óleo novo à 40°C.....	35
Tabela 6 - Medição de viscosidade do óleo novo à 50°C.....	35
Tabela 7 - Medição de viscosidade do óleo novo à 60°C.....	36
Tabela 8 - Medição de viscosidade do óleo novo à 70°C.....	36
Tabela 9 - Medição de viscosidade do óleo novo à 80°C.....	37
Tabela 10 - Medição de viscosidade do óleo usado à 40°C.	37
Tabela 11 - Medição de viscosidade do óleo usado à 45°C.	38
Tabela 12 - Medição de viscosidade do óleo usado à 50°C.	38
Tabela 13 - Medição de viscosidade do óleo usado à 55°C.	39
Tabela 14 - Medição de viscosidade do óleo usado à 60°C.	39
Tabela 15 - Medição de viscosidade do óleo usado à 65°C.	40
Tabela 16 - Medição de viscosidade do óleo usado à 70°C.	40
Tabela 17 - Medição de viscosidade do óleo usado à 75°C.	41
Tabela 18 - Medição de viscosidade do óleo usado à 80°C.	41
Tabela 19 - Medição óleo novo com Rheo-Viscosímetro a 22° C.	43
Tabela 20 - Amostras de Ácido Benzoico.	53
Tabela 21 - Constantes obtidas com a queima das amostras de ácido benzoico.	57
Tabela 22 - Plano de Ação.....	58
Tabela 23 - 2º Amostragem de Ác. Benzoico.....	58
Tabela 24 - Resultado obtido da constante com a 2º análise da queima do ác. benzoico	59
Tabela 25 - Resultado da análise do grafite.....	60
Tabela 26 - Resultado da análise de PCS do óleo novo.	61
Tabela 27 - Resultado da análise de PCS do óleo usado.	61
Tabela 28 - Dados de PCS e PCI de alguns hidrocarbonetos	63
Tabela 29 - Recomendações para projeto de atomizador tipo y , segundo Mullinger e Chigier (1974).....	71
Tabela 30 - Planilha de dimensionamento do Atomizador.....	75

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA.....	I
AGRADECIMENTOS	II
LISTA DE FIGURAS	III
LISTA DE TABELA	V
SUMÁRIO	VI
RESUMO.....	9
1 O QUEIMADOR.....	11
1.1 Introdução	11
1.2 Definição	11
1.3 Princípio de Funcionamento	12
1.4 Queima de Combustíveis Líquidos	13
2 LEGISLAÇÃO PERTINENTE.....	14
2.1 Análise Jurídica.....	14
3 CARACTERIZAÇÃO DO ÓLEO LUBRAX TOP TURBO 15W40.....	15
3.1 Ensaio de Densidade	16
3.1.1 Densidade	16
3.1.2 Descrição do Experimento	16
3.1.3 Conclusão	18
3.2 Ensaio de Viscosidade	19
3.2.1 Viscosidade	19
3.2.1.1 Viscosidade Dinâmica dos Líquidos	19
3.2.1.2 Coeficiente de Viscosidade Dinâmica	20
3.2.1.3 Viscosidade Cinemática	20
3.2.1.4 Coeficiente de Viscosidade Cinemática.....	20
3.2.2 Viscosímetros	21
3.2.2.1 Viscosímetros mais Usados para Lubrificantes	23
3.2.3 Experimento de Viscosidade	27
3.2.3.1 Objetivo	27
3.2.3.2 Descrição do Experimento	27

3.2.3.3 Conclusão	44
3.3 Ensaio de Poder Calorífico	44
3.3.1 Poder Calorífico	44
3.3.2 Calorímetro.....	46
3.3.2.1 Esquema Básico do Calorímetro	47
3.3.2.2 Instalação.....	47
3.3.2.3 Metodologia de Preparação da Amostra	47
3.3.3 Experimento do Poder Calorífico.....	48
3.3.3.1 Objetivo	48
3.3.3.2 Descrição do Experimento	48
3.3.3.3 Conclusão	64
3.4 Ensaio do Ponto de Fulgor.....	64
3.4.1 Ponto de Fulgor	64
3.4.2 Cleveland Open Cup (COC)	65
3.4.3 Experimento do Ponto de Fulgor	65
3.4.3.1 Objetivo	65
3.4.3.2 Descrição do Experimento	66
3.4.3.3 Conclusão	66
3.5 Ensaio de Partículas Magnéticas.....	66
3.5.1 Objetivo	66
3.5.2 Descrição do Experimento	67
3.5.3 Conclusão	67
3.6 Ensaio do Teor de Sólidos	67
3.6.1 Objetivo	67
3.6.2 Descrição do Experimento	67
3.6.3 Conclusão	69
3.7 Ensaio de Espectrometria.....	69
3.7.1 Objetivo	69
3.7.2 Descrição do Experimento	69
3.7.3 Conclusão	69

4	DIMENSIONAMENTO DO QUEIMADOR DE ÓLEO.....	70
4.1	Atomizador Tipo y	70
4.2	Cálculo do Atomizador	72
4.3	Comentário dos Resultados.....	75
5	CONCLUSÃO.....	81
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	82

RESUMO

Este presente projeto de graduação visa o dimensionamento de um queimador que queime bem óleo lubrificante usado de motores de caminhão das marcas Volvo (motor D12) e Mercedes Benz (motor OM 457) com idade média dos veículos de 3 anos, sendo o período de troca, de acordo com o fabricante Petrobrás, de 45000 km.

O queimador em questão terá a finalidade de ser utilizado para secagem de café (Figura 1) na fazenda Belmok, localizada em Cachoeira Grande, no município de Alfredo Chaves, com secagem média de 180 sacos durante 15 horas num período de 3 meses.



Figura 1 - Secador de Café.

O combustível escolhido em detrimento à madeira, que até então é utilizada, será o óleo lubrificante Petrobrás Lubrax Top Turbo 15W40 usado do tipo parafínico, composto de hidrocarbonetos dos tipos alcanos e cicloalcanos com teores menores de hidrocarbonetos poliaromáticos [1].

A razão da escolha deste óleo como combustível está no fato do mesmo se apresentar em grande disponibilidade, pois será oriundo de uma transportadora que gera mais 2000 l/mês, além de produzir baixa quantidade de resíduos quando bem queimado e de apresentar maior poder calorífico que a madeira, que ao ser usada como combustível (Figura 2), gera grande

quantidade de resíduos (aldeídos, cetonas, benzenos), além de apresentar instabilidade da queima (variação da temperatura), necessidade de mão de obra para abastecimento da câmara de combustão, incentivo ao desmate e dificuldade em ser adquirida já que são utilizadas 36 toneladas por mês para a secagem do café.



Figura 2 - Utilização da madeira como combustível na secagem do café.

O Decreto de Lei nº 153/2003 de 11-07-2003, que estabelece regime jurídico da gestão de óleos usados, em seu artigo 20º, permite a valorização energética de óleos lubrificantes usados desde que devidamente autorizado e respeitando os níveis de emissões, sem prejuízos das demais legislações aplicáveis [2].

1 O QUEIMADOR

1.1 Introdução

Desde os tempos mais remotos que se tem verificado uma busca incessante do fogo por parte do homem, que se tornou numa dependência. A fonte de calor encontrada era utilizada inicialmente para aquecer, cozinhar e iluminar. Estas necessidades básicas permanecem atualmente e outras foram surgindo, acompanhando o progresso e o desenvolvimento da sociedade.

As técnicas que existem hoje são muito diferentes das rudimentares que se precederam, e a dependência do fogo é hoje ainda maior. Agora é também necessário satisfazer a indústria e o comércio, e claro, o conforto doméstico tão apreciado. Os fornos industriais, a geração de energia elétrica e as caldeiras utilizadas para o aquecimento dos lares, são fortes exemplos da sua aplicação.

Também os combustíveis têm vindo a mudar, pois a preocupação com o meio ambiente e a poluição emitida por este tipo de equipamentos tem vindo a aumentar [3].

1.2 Definição

Um queimador é um equipamento que mediante o processo de combustão, tem por fim realizar a transformação de energia química de um combustível em calor. O combustível pode ser líquido, gasoso ou sólido. Além de providenciar o calor, o queimador controla também a temperatura de saída e pressão, e é essencial que a queima de combustível seja eficiente para que o consumo de combustível seja reduzido.

O queimador tem também um papel preponderante na estabilização de chama, promovendo:

- Recirculação (interna ou externa) dos gases da chama de modo a aquecer a mistura ar/combustível;
- Turbulência da mistura;
- Atomização (pulverização) correta de combustível;

Devido a esta última função, por vezes os queimadores são apenas referidos por atomizadores, uma vez que é esta a sua principal característica e também é ela que diferencia os diversos tipos de queimadores.

Existem métodos que podem ajudar a melhorar a atomização de um determinado líquido, com a formação de gotículas de diâmetros reduzidos, rapidez e atomização completa [3].

1.3 Princípio de Funcionamento

Não existe um modelo standard para o funcionamento de um queimador, pois cada fabricante introduz um determinado parâmetro e alterações ao seu queimador, o que pode estar associado ao tipo de combustível utilizado e no caso de este ser líquido, ao tipo de atomização. No entanto, de forma bastante simples e geral pode efetuar-se uma breve descrição das características funcionais comuns de maioria dos queimadores.

O combustível e o ar são transportados por canais no interior do queimador, até a denominada cabeça do queimador. Esta zona promove a introdução de combustível e de ar na câmara de combustão (a reação não ocorre no interior do queimador), onde devido à elevada velocidade do ar se misturam. Quando chega à câmara de combustão o combustível estará sob a forma de pequenas gotas (para combustível líquido), pequenas partículas (no caso de combustível sólido), ou vaporizado (no caso de ser um gás). Após esta mistura ocorre a ignição acompanhada da libertação de calor pretendida. A ignição pode ocorrer através de uma pequena faísca, que se situa perto da cabeça do queimador, ou através de uma chama piloto que irá provocar a ignição da chama principal. Após o início da reação a chama é auto sustentada, e a alimentação de ar é efetuada de duas formas: O ar primário que é introduzido junto ou simultaneamente com o combustível e o ar secundário que é introduzido para próximo da zona de chama e que por arrastamento irá ser misturado e não deixará que a chama se extinga.

Quanto à potência debitada, existem também queimadores de potência variável ou fixa. Os primeiros, ao contrário dos segundos iniciam o seu funcionamento com baixa potência e aumenta o tamanho da chama imediatamente após se ter atingido um processo reativo estável. Quando a potência pretendida é atingida a chama em vez de se extinguir (como acontece com

os queimadores de potencia fixa) é apenas reduzida aumentando novamente quando é necessária mais potência [4].

1.4 Queima de Combustíveis Líquidos

A queima de combustíveis líquidos se processa nos seguintes estágios sucessivos:

- 1) Atomização, onde o combustível é desagregado, por processos mecânicos, em pequenas gotículas;
- 2) Vaporização, onde o combustível atomizado passa para a fase gasosa, através do calor conduzido da chama para as gotas;
- 3) Mistura, onde o combustível, na fase gasosa, é misturado com o comburente, constituindo a mistura inflamável;
- 4) Combustão, na qual a mistura inflamável queima produzindo reações exotérmicas.

Desses estágios, o mais crítico e importante é a atomização, que visa o aumento da superfície específica do combustível facilitando sua vaporização, condição indispensável à sua íntima mistura com o comburente [5].

A atomização envolve a formação de películas e/ou ligamento na proximidade do atomizador e posteriormente de gotículas. Este passo é de grande importância, e uma boa atomização é essencial para o processo de combustão. Ela é fortemente influenciada pela geometria e diâmetro do atomizador, assim como pelas propriedades do líquido, do fluido de atomização, velocidade relativa dos mesmos, assim como pelas condições (temperatura, umidade, entre outros) do meio circundante [3].

É considerado, como eficiente, uma atomização que pulverize 1cm^3 de combustível em cerca de 10.000.000 gotículas (diâmetro médio de $60\mu\text{m}$), aumentando a superfície específica em mais de 200 vezes [5].

2 LEGISLAÇÃO PERTINENTE

Antes do dimensionamento do queimador, se fez necessário averiguar a legislação que permita o reaproveitamento do óleo lubrificante usado como fonte de energia.

2.1 Análise Jurídica

Decreto-Lei n.º 153/2003

de 11 de Julho

Operações de gestão de óleos usados:

A realização de operações de armazenagem, tratamento e valorização energética de óleos usados depende da obtenção de uma autorização prévia (Art. 15º, n.º 1), exceto para a sua armazenagem nos locais de produção (Art. 15º, n.º 2), só podendo ser levadas a cabo por operadores que possuam um número de registro, a atribuir pelo Instituto dos Resíduos (Arts. 16º, n.º 1, 17º, n.º 1, 18º, n.º 1, 19º, n.º 1 e 20º, n.º 1); a valorização interna de óleos usados depende de uma autorização específica, a conceder pelo Instituto dos Resíduos (Art.15º, n.º 3); estas autorizações só podem ser concedidas se tiverem sido adaptadas todas as medidas adequadas à proteção da saúde e do ambiente (Art. 15º, n.º 4). Os operadores de regeneração de óleos usados devem assegurar-se que os óleos de base resultantes dessa operação não são substâncias perigosas (Art. 19º, n.º 2), sendo possível regenerar óleos usados que contenham PCB (Bifenil Policlorinado), desde que os PCB sejam destruídos durante a operação de regeneração (Art. 19º, n.º 3)[2].

3 CARACTERIZAÇÃO DO ÓLEO LUBRAX TOP TURBO 15W40

Para a caracterização do óleo foram realizados alguns ensaios, tais como:

- ✓ Ensaio de densidade que será necessário para a realização do ensaio de viscosidade além de ser utilizado no dimensionamento do queimador;
- ✓ Ensaio de viscosidade que é de fundamental importância para o cálculo do dimensionamento do queimador;
- ✓ Ensaio de poder calorífico para averiguar a possibilidade deste óleo ser usado como combustível em detrimento da madeira;
- ✓ Ponto de fulgor para determinar a temperatura a partir da qual ocorrerá o início da queima do óleo ;
- ✓ Ensaio de partículas magnéticas para determinação qualitativa da presença de impurezas no óleo;
- ✓ Verificação do teor de sólidos, para definir a percentagem de impurezas presentes neste óleo para que não venham a obstruir o queimador;
- ✓ Espectrometria.

3.1 Ensaio de Densidade

3.1.1 Densidade

É a relação entre massa de um determinado volume de produto, à temperatura "t" pela massa de igual volume de água destilada, a uma dada temperatura.

Com base no princípio de que todo corpo mergulhado em um líquido desloca um volume igual ao do líquido deslocado, mede-se a densidade de um aparelho chamado densímetro, este tem haste graduada, dando leitura direta.

A densidade de um lubrificante, analisada juntamente com outras características, dá informações significativas acerca do óleo novo[6].

3.1.2 Descrição do Experimento

O objetivo da análise de densidade está no fato de que esses dados serão de grande importância para o dimensionamento do queimador além de ser necessário para a realização do ensaio de viscosidade.

Os aparelhos utilizados para medição da viscosidade do óleo Lubrax Top Turbo 15W40 usado e novo foram:

- ✓ Banho do viscosímetro;
- ✓ Termômetro;
- ✓ Resistência elétrica;
- ✓ Proveta de 100 ml;
- ✓ Termostato;
- ✓ Densímetros;
- ✓ Suporte para o termômetro;



Figura 3 - Montagem da Experiência de Densidade.

O experimento consistiu em tomar uma amostra de 65 ml de óleo Lubrax Top Turbo 15w40 tanto usado quanto novo numa proveta e inseri-los num banho contendo água, sendo avaliado, primeiramente, a densidade do óleo novo e em seguida a do usado (Figura 3). Nesse banho era realizado o controle de temperatura através de um termostato que controlava o aquecimento da água por uma resistência elétrica. Foram feitas medições nas temperaturas de 40°C a 80°C de ambas as amostras (Tabela 1) com uma variação de 5°C na escala. O ajuste fino foi feito com um termômetro preso à um suporte e mergulhado parte deste no óleo de forma que sua temperatura estivesse no valor desejado.

Densímetros de valores que variavam de 0,820 a 0,880 e 0,880 a 0,940 foram utilizados no experimento. Sendo que a amostra de óleo novo foi caracterizada somente com o primeiro densímetro e na de óleo usado foi utilizado o primeiro na faixa de temperatura de 50° C a 80°C e o segundo de 40° e 45°C.

3.1.3 Conclusão

Foi observado que à medida que a temperatura aumentava o valor de densidade diminuía (Figura 4), sendo que a evolução dos valores de densidade foi de forma aproximadamente linear com a temperatura.

Temperatura (°C)	Densidade(g/cm³)	
	Óleo Usado	Óleo Novo
40	0,884	0,872
45	0,881	0,869
50	0,878	0,866
55	0,875	0,863
60	0,872	0,860
65	0,869	0,857
70	0,866	0,853
75	0,863	0,850
80	0,860	0,847
Óleo Lubrax 15W40 TopTurbo		

Tabela 1 - Resultado Comparativo da Densidade dos óleos.

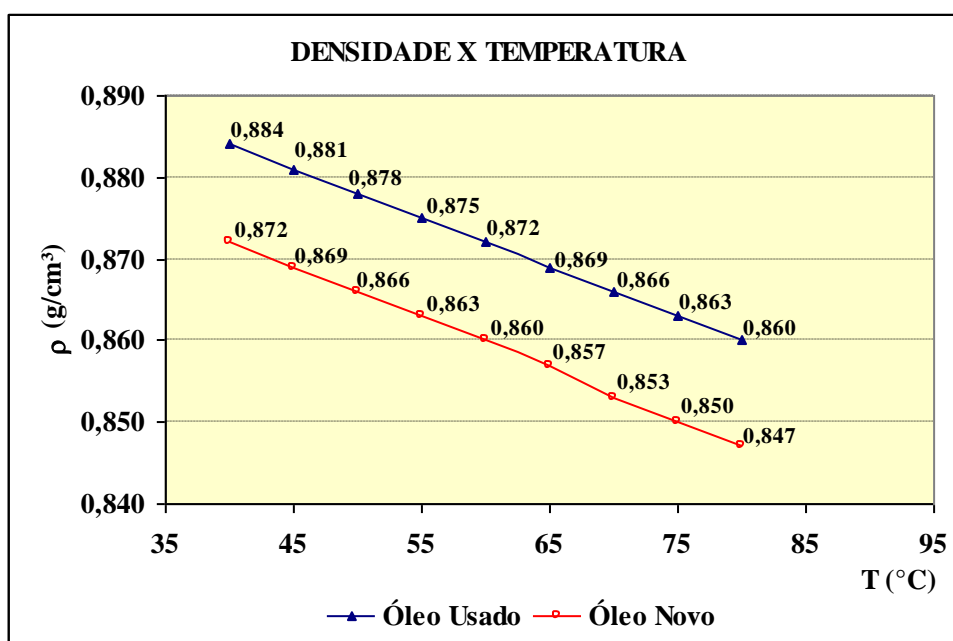


Figura 4 - Gráfico comparativo da Densidade dos óleos.

3.2 Ensaio de Viscosidade

3.2.1 Viscosidade

A viscosidade é a principal propriedade física dos óleos lubrificantes. Ela está relacionada com o atrito entre as moléculas do fluido (líquido ou gás), podendo ser definida como a resistência ao escoamento que os mesmos apresentam [7]. Ela varia com a temperatura e a pressão, sendo, porém mais sensível à temperatura que à pressão. As variações de temperatura produzem variações opostas em gases e líquidos. Quando a temperatura aumenta, a viscosidade do líquido diminui, porém a viscosidade do gás aumenta.

3.2.1.1 Viscosidade Dinâmica dos Líquidos

A viscosidade dos líquidos aumenta em função da pressão aplicada. Isto é devido, provavelmente, a nenhum líquido ser completamente incompressível e ao diminuir seu volume haveria uma aproximação das moléculas, o que provocaria o aumento das forças de atrito entre as camadas de líquido.

A expressão matemática para tal variação, uma função exponencial proposta por barns (1893), não é contudo, praticamente utilizada, pois além de ser pequena esta variação, só seria aplicada a poucas aplicações.

Nas aplicações usuais da engenharia, a viscosidade dos líquidos pode ser considerada como sendo função do líquido e da sua temperatura.

Para os líquidos a viscosidade está diretamente relacionada com a coesão entre as moléculas e como esta coesão diminui com o aumento da temperatura, pode-se concluir que a sua viscosidade também diminui.

Pesquisadores concluíram que a viscosidade dos líquidos é uma função exponencial do inverso da temperatura e daí, através desta consideração obtiveram uma série de fórmulas empíricas para a determinação da viscosidade em função da temperatura [8].

3.2.1.2 Coeficiente de Viscosidade Dinâmica

O coeficiente de viscosidade dinâmico μ , é o parâmetro que produz a existência de esforços tangenciais nos líquidos em movimento. Depende do atrito interno do fluído (isto é, da força de atrito entre camadas diferentes do fluído que se move com velocidades diferentes. As dimensões são M/LT. No sistema S.I., μ exprime-se em poiseulle (PL), tal que 1 PL = 1 Kg / m.s. No sistema C.G.S. a unidade é o poise (g / cm.s). Geralmente utiliza-se o centipoise que vale a centésima parte do poise [9].

3.2.1.3 Viscosidade Cinemática

A viscosidade cinemática é geralmente obtida em laboratórios através dos viscosímetros e é definida como sendo a relação entre a viscosidade dinâmica e a massa específica do fluido, ambas consideradas à mesma pressão e temperatura.

A viscosidade cinemática foi criada a partir da equação de Poiseuille, para a determinação da viscosidade em viscosímetros industriais. Esta lei é válida para escoamentos laminares e em regime permanente, desde que o fluido seja considerado Newtoniano e seu escoamento seja considerado incompressível. a equação relaciona o tempo necessário (t) para que um volume padrão (V) de um dado fluido a uma pressão “P”, escoe em um capilar de comprimento “L” e raio “R” [8].

$$v = \frac{\mu}{\rho} = \frac{\pi}{8} \times \frac{p \times R^4}{V \times \rho \times L} \times t$$

3.2.1.4 Coeficiente de Viscosidade Cinemática

O coeficiente de viscosidade cinemática, v , é o quociente entre o coeficiente de viscosidade dinâmica e a massa específica: $v = \mu / \rho$.

As dimensões de ν são o L^2/T . no sistema S.I. exprime-se em m^2/s . No sistema C.G.S. a unidade é o stokes (St). Em geral a unidade é o centistokes (cSt), que vale a centésima parte do stock [9].

3.2.2 Viscosímetros

Viscosímetros são instrumentos utilizados para medir a viscosidade (de líquidos). Eles podem ser classificados em dois grupos: primário e secundário.

No grupo primário enquadram-se os instrumentos que realizam uma medida direta da tensão e da taxa de deformação da amostra de fluido. Instrumentos com diversos arranjos podem ser concebidos para este fim: entre eles há o de disco, de cone-disco e de cilindro rotativo.

Os respectivos esquemas estão mostrados na Figura 5. O símbolo Ω (refere-se à rotação aplicada e T ao torque medido, que resulta da tensão oriunda da deformação do fluido.

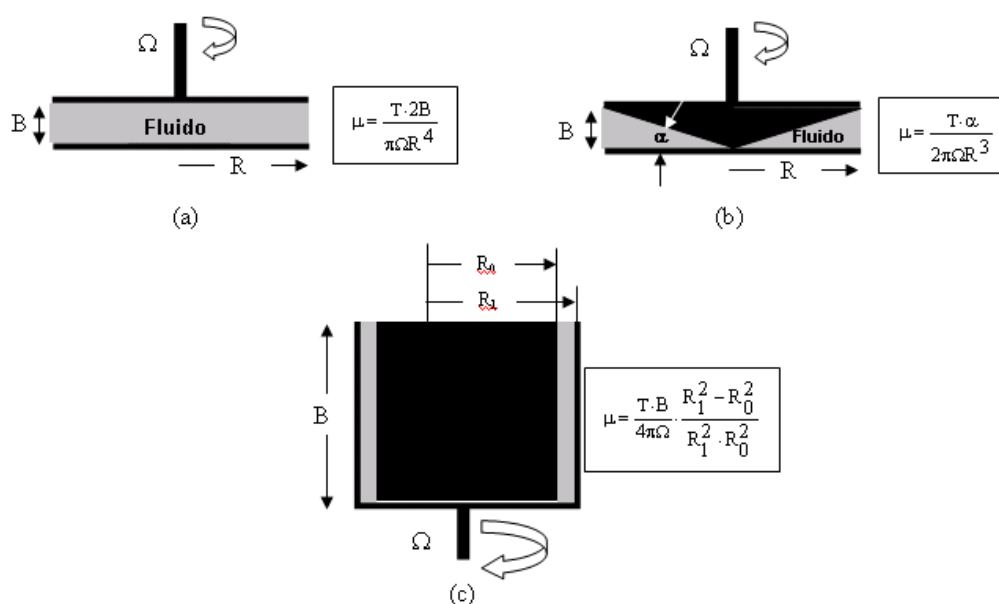


Figura 5 - Representação esquemática dos viscosímetros rotativos: (a) disco, (b) cone-disco e (c) cilindro.

Os viscosímetros do grupo secundário inferem a razão entre a tensão aplicada e a taxa de deformação por meios indiretos, isto é, sem medir a tensão e deformação diretamente. Nesta categoria pode-se citar o viscosímetro capilar onde a viscosidade é obtida por meio da medida

do gradiente de pressão e o viscosímetro de Stokes onde ela é determinada pelo tempo de queda livre de uma esfera, veja representações esquemáticas na Figura 6.

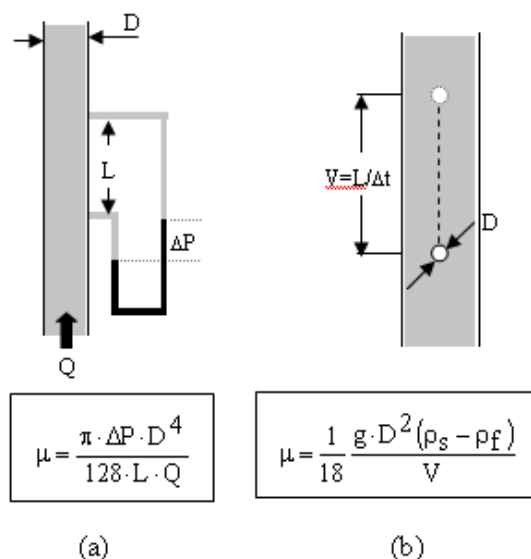


Figura 6 - Representação esquemática do viscosímetro (a) Capilar e de (b) Stokes.

No viscosímetro Capilar Q , L , ΔP e D são, respectivamente, a vazão volumétrica, a distância entre as tomadas de pressão, o diferencial de pressão e o diâmetro do tubo capilar. Esta relação aplica-se para um escoamento de Poiseuille, isto é, um escoamento em regime laminar e hidrodinamicamente desenvolvido.

No viscosímetro de Stokes as variáveis: g , D , ρ_s , ρ_f e V são, respectivamente, a aceleração da gravidade, o diâmetro da esfera, a densidade da esfera, a densidade do fluido e a velocidade terminal de queda livre, isto é, a razão entre a distância L e o intervalo de tempo Δt . Esta relação aplica-se somente para esferas em queda livre em meio infinito com Reynolds menores do que 1.

Como os viscosímetros primários realizam medidas diretas da taxa de deformação e da tensão eles podem ser aplicados para ensaios tanto de fluidos Newtonianos como de fluidos com comportamento tensão versus deformação não-linear e/ou visco-elástico. Os viscosímetros secundários, por outro lado, aplicam-se principalmente a fluidos Newtonianos, por medirem a viscosidade indiretamente. Esta é a principal diferença entre eles. Outros aspectos que os diferenciam podem ser citados:

- a) O volume requerido de amostra nos viscosímetros de disco e cone-disco são os menores;
- b) A faixa operacional nos viscosímetros de disco e cone-disco é a maior;
- c) O custo do viscosímetro de Stokes é o menor. Entretanto, é o que necessita de maior volume de fluido e só trabalha com líquidos translúcidos;
- d) Pelo fato de requererem o menor volume de fluido, os viscosímetros de disco e cone-disco são os que mais facilmente se adaptam para ensaios em temperaturas diferentes da temperatura ambiente [10].

3.2.2.1 Viscosímetros mais Usados para Lubrificantes

São os seguintes os viscosímetros mais comumente usados para medir viscosidade de óleo lubrificante:

- a) Saybolt;
- b) Redwood;
- c) Engler;
- d) Cinemático (uso universal).

Os viscosímetros Saybolt, Redwood e Engler têm uma construção semelhante. Todos eles se compõem basicamente de um tubo de seção cilíndrica, com um estreitamento na parte inferior. Uma determinada quantidade de fluido é contida no tubo que, por sua vez, fica mergulhada em banho de água ou óleo de temperatura controlada por termostato. Uma vez atingida e mantida a temperatura escolhida, deixa-se escoar o líquido através de orifício inferior, ao mesmo tempo em que se começa a contagem de tempo. Recolhe-se o fluido em frasco graduado e, no momento em que o nível atingir o traço de referência do gargalo, faz-se parar o cronômetro [7].

a) Viscosidade Saybolt:

No método Saybolt (Figura 7), a passagem de óleo de um recipiente no aparelho é feita através de um orifício calibrado, para um frasco de 60 ml, verificando-se o tempo decorrido para seu enchimento até o traço de referência [7].

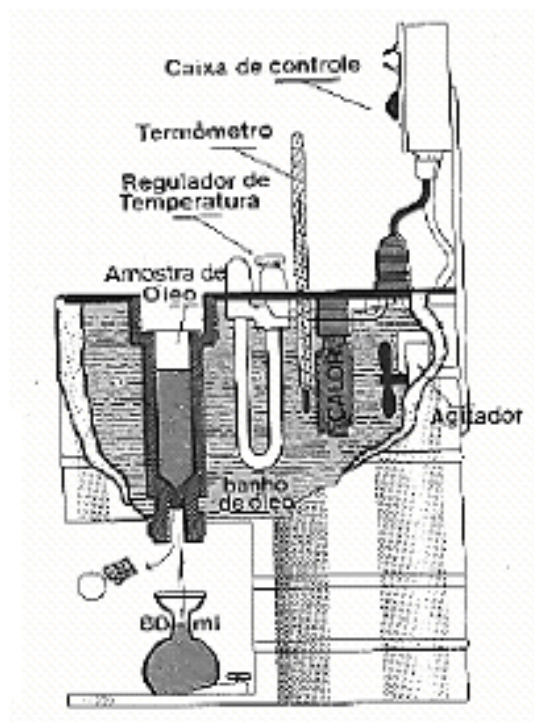


Figura 7 - Representação esquemática do Viscosímetro de Saybolt.

Como a viscosidade varia com a temperatura, isto é, quanto mais aquecido estiver o óleo, menor será a sua viscosidade, seu valor deve vir acompanhado da temperatura em que foi determinada. Assim sendo, este método utiliza as temperaturas padrões de 100°F (37,8°C) e 210°F (98,9°C).

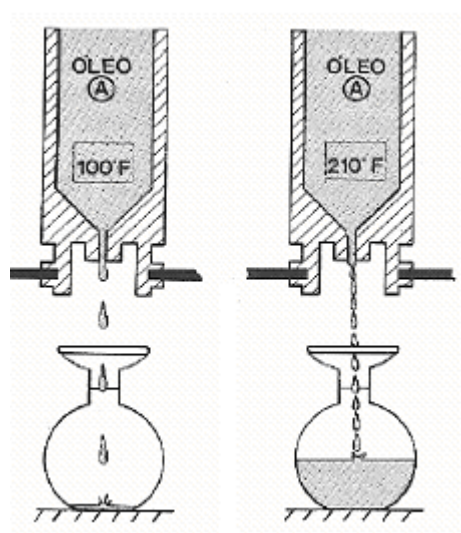


Figura 8 - Representação Esquemática do Método de Saybolt utilizando as temperaturas padrão.

A viscosidade Saybolt possui dois tipos de tubos: universal e furol. A diferença entre os dois está no diâmetro do tubo capilar que regula o escoamento do fluido, sendo que o tubo furol permite um escoamento em tempo aproximadamente dez vezes menor do que o tubo universal.

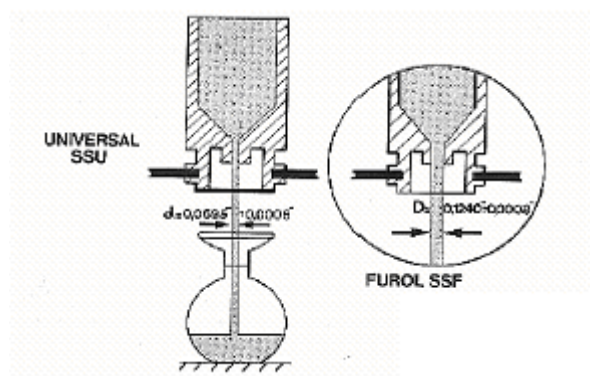


Figura 9 - Representação esquemática dos tubos universal e furol utilizados pelo método de Saybolt.

b) Viscosidade Redwood:

O viscosímetro Redwood (Figura 10) é semelhante ao Saybolt. As temperaturas usuais de determinação são: 70, 77, 86, 100, 140, e 200°F. Como no saybolt, este método possui dois tubos padrões: o n.º 1, universal, e n.º 2, admiralty, sendo o valor numérico em SR1 aproximadamente igual a dez vezes o valor numérico em SR2. A leitura do cronômetro dará a viscosidade Redwood em segundos Redwood [7].

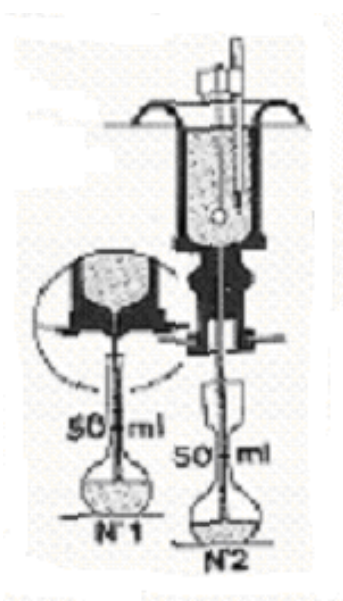


Figura 10 - Representação esquemática do Viscosímetro Redwood.

c) Viscosidade Engler:

O viscosímetro Engler (Figura 11) é também semelhante ao Saybolt. Este método utiliza as seguintes temperaturas padrões: 20°C, 50°C e 100°C. O resultado do teste é referido em grau Engler (°E) que, por definição, é a relação entre o tempo de escoamento de 200 ml de óleo, a 20°C (ou 50°C ou 100°C) e o tempo de escoamento de 200 ml de água destilada a 20°C [7].

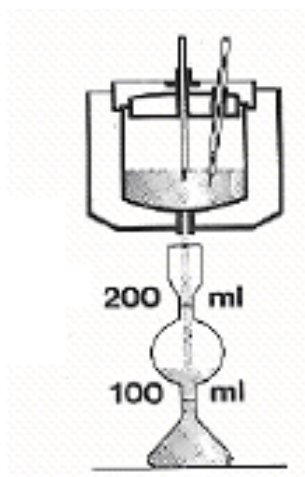


Figura 11 - Representação esquemática do Viscosímetro Engler.

d) Viscosidade Cinemática:

O viscosímetro cinemático (Figura 12) é basicamente constituído de um tubo capilar de vidro, através do qual se dá o escoamento do fluido.

No método cinemático, um tubo capilar é abastecido até determinado nível. Por sucção, o óleo é levado até uma marca em um dos lados do tubo. Parando-se de succionar, o óleo tende a voltar para a posição inicial, passando por uma segunda marca de referência. É anotado o tempo, segundos, que o nível do óleo leva para passar pelos dois traços de referência. Para cada faixa de viscosidade dos óleos é utilizado um tubo capilar com determinado diâmetro e, para cada tubo, é determinado um fator de correção “C” do tubo para o cálculo da viscosidade em centistokes (cSt):

$$\text{Viscosidade em cSt} = C \times t$$

Sendo t , o tempo de escoamento, em segundos, determinado no viscosímetro cinemático.

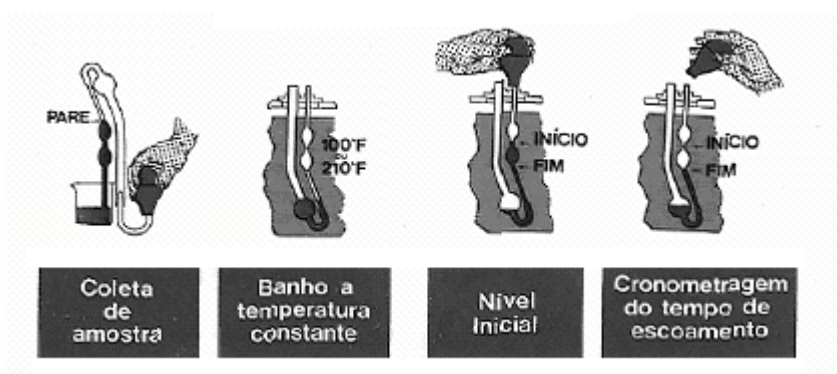


Figura 12 - Representação das etapas de medição no Viscosímetro Cinemático.

O viscosímetro Cinemático apresenta maior precisão em relação aos viscosímetros Saybolt, Redwood e Engler [7].

3.2.3 Experimento de Viscosidade

3.2.3.1 Objetivo

Obtenção da curva de viscosidade do óleo Lubrax Top Turbo 15W40 usado em função da temperatura, visto que esses dados serão de suma importância para o dimensionamento do queimador. Também foi feito o ensaio deste óleo na condição nova como forma de comparação.

As temperaturas de ensaio evoluíram de 40 a 80° C, tendo uma variação de 5° C no caso do óleo usado e de 10° C no caso do óleo novo.

3.2.3.2 Descrição do Experimento

Para a realização deste experimento, será utilizado o método de Stokes, onde a viscosidade é determinada pelo tempo de queda livre de uma esfera através do fluido do qual se deseja obter a viscosidade.

Um primeiro ensaio será com a utilização de uma proveta contendo amostra do óleo, onde se deixará cair uma esfera em queda livre e será medido o tempo de queda da mesma.

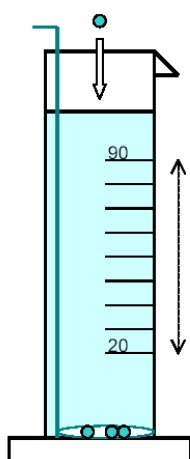
Num segundo teste, será utilizado o Rheo-Viscosímetro KD 2.1, que segue o princípio de funcionamento do viscosímetro de Höppler (Figura 13), que é caracterizado pelo escoamento de uma esfera a baixa velocidade, caracterizando um escoamento laminar.



Figura 13 - Viscosímetro de Höppler.

a) Ensaio Utilizando Proveta:

Como primeira proposta de análise, utilizou-se uma proveta calibrada de 1000 ml, duas esferas de vidro, um termômetro e um cronômetro manual, conforme Figura 14.



(a)



(b)



(c)

Figura 14 - (a) Representação esquemática do ensaio, (b) Montagem do ensaio, (c) Esferas utilizadas.

O teste consistiu em determinar dois marcos na proveta e em seguida liberar as esferas e marcar o tempo de queda das mesmas. O resultado da medição está mostrado na Tabela 2.

MEDIÇÃO DE VISCOSIDADE T=22 °C			
Medição		M(g/cm³)	
		Es fera 1	Esfera 2
1	t(s)	0,84	0,81
2		0,91	0,88
3		0,92	0,94
4		1,00	0,84
5		0,87	0,95
t médio		0,91	0,88
r(cm)		0,70735	0,75730
r(g/cm³)		2,4094	2,4102
D S (cm)		21,609	
v (cm/s)		23,80	24,44
[4/3r²(r-ρ)g]/6v (g/cm.s)		6,993365761	7,808134153

g	980	(cm/s²)	
μ	740,07	(mPa.s)	(viscosidade dinâmica)
ρ_o	0,882	(g/cm³)	(densidade)
v	839,09	(cSt)	(viscosidade cinemática)

Tabela 2 - Viscosidade do óleo novo à 22°C pelo Método da Proveta.

Este ensaio foi realizado à temperatura ambiente e somente com o óleo no estado novo devido à falta de controle de temperatura, visto que não foi possível encontrar um dispositivo que permitisse essa manobra, e à deficiência de visualização da esfera com o óleo no estado usado. Outros fatores de introdução de erros, além do fator temperatura, foi o controle do tempo, feito manualmente e a queda não linear das esferas dentro da proveta.

b) Ensaio Utilizando o Rheo-Viscosímetro:



Figura 15 - Rheo-Viscosímetro.

Possibilidade de investigar quaisquer substâncias fluidas num alcance de 4 a 4×10^6 mPa.s desde que não ataquem os dispositivos de medição que são de vidro.

Pode-se medir viscosidade de fluidos Newtonianos (de viscosidade pura) assim como viscosidade de anomalias de fluência de líquidos não Newtonianos (viscosidade estrutural).

Como resultado, obtêm-se as características de fluência segundo tempo, temperatura e a tensão de cisalhamento. As tensões tangenciais ou de cisalhamento podem ser modificadas facultativamente alterando seus pesos.

Obtém-se a viscosidade dinâmica (mPa.s), multiplicando o tempo de queda, tensão cisalhamento e as constantes do recipiente de medição [11].

$$\mu = (M + A) \times t \times K$$

Onde:

μ = Viscosidade dinâmica, mPa.s ;

M = Soma de todos os números estampados, g/cm² sobre os pesos colocados para uma medição;

A = Constante, um fator encontrado pelo fabricante para cada recipiente de medição, g/cm²;

K = Constante, um fator encontrado pelo fabricante para cada recipiente de medição, mPa.cm²/g.

b.1) Calibração do Rheo-Viscosímetro:

Para determinar o quão precisa seria o resultado da análise da viscosidade com o uso do Rheo-Viscosímetro, fez-se necessária sua calibração com dois óleos padrões secundários fornecidos pela Petrobrás.

As características dos óleos são:

Padrão secundário 1:

Viscosidade a 100° C: 3,93 cSt

Viscosidade a 40° C: 17,25 cSt

Densidade a 22,5° C: 0,82

Padrão secundário 2:

Viscosidade a 100° C: 10,81cSt

Viscosidade a 40° C: 95,89 cSt

Densidade a 22,9° C: 0,89

Todas essas medições padrão foram realizadas segundo a Petrobrás no dia 25 de agosto de 2003.

Seguindo o procedimento operacional do Rheo-Viscosímetro [11], foram obtidos os seguintes resultados mostrados na Tabela 3.

PADRÃO SECUNDÁRIO 01 T= 40°C					
Medição		M (g/cm²)			
		50	70	90	120
1	t(s)	66,72	46,76	36,35	27,36
2		65,98	46,81	36,66	27,52
3		65,63	47,08	36,85	27,68
4		65,56	46,88	36,76	27,68
5		65,75	46,79	36,60	27,63
t médio		65,93	46,86	36,64	27,57
A (g/cm²)		0,375			
(a + M).t (s.g/cm²)		3321,123	3298,054	3311,7015	3319,2203

Média	3312,5247	(s.g/cm ²)
K	0,004289	(mPa.cm ² /g)
μ	14,21	(mPa.s) (viscosidade dinâmica)
ρ	0,805	(g/cm ³) (densidade)
ν	17,65	(cSt) (viscosidade cinemática)
ref.	17,25	(cSt) (viscosidade cinemática de referência)
dif.	2,3%	

PADRÃO SECUNDÁRIO 02 T= 40°C					
Medição		M (g/cm²)			
		10	20	40	70
1	t(s)	90,44	45,33	22,73	12,85
2		90,50	45,22	22,55	12,86
3		90,67	45,11	22,62	12,87
4		90,96	45,13	22,57	12,92
5		91,10	45,29	22,54	12,84
t médio		90,73	45,22	22,60	12,87
A (g/cm²)		-0,3607			
(a + M).t (s.g/cm²)		874,61225	888,01059	895,92746	896,11851

Média	888,6672	(s.g/cm ²)
K	0,097134	(mPa.cm ² /g)
μ	86,32	(mPa.s) (viscosidade dinâmica)
ρ	0,874	(g/cm ³) (densidade)
ν	98,76	(cSt) (viscosidade cinemática)
ref.	95,89	(cSt) (viscosidade cinemática de referência)
dif.	3,0%	

Tabela 3 - Resultados da viscosidade dos óleos padrões à 40°C.

Como se pode ver, o procedimento de análise da viscosidade do óleo poderá ser realizado com uma incerteza de 3,0% através do uso do Rheo-Viscosímetro, que é considerada pequena.

b.2) Procedimento de Ensaio:

Para determinação da viscosidade do óleo Lubrax Top Turbo 15W40 usado e novo, foi utilizado o Rheo-Viscosímetro juntamente com um banho termostático para controle de temperatura da água de circulação, visto que a viscosidade de qualquer líquido depende muito da temperatura. Como se pode ver na Figura 16, esse banho contém uma bomba para homogeneizar a temperatura da água e fazê-la circular no circuito viscosímetro-banho, além de uma resistência elétrica para aquecimento e um termostato que tem a finalidade de fazer o controle de temperatura, tendo como temperatura máxima 100 °C em sua escala.



Figura 16 - Banho termostático.

Para medição no aparelho são utilizados 5 dispositivos de medição denominados cubetas (Figura 17), onde são colocadas as amostras de líquido. A escolha dessa cubeta depende da viscosidade do líquido de ensaio, sendo que para cada uma existe uma faixa de medição mostrada na Tabela 4. A escolha da cubeta indicará o tipo de vareta porta-bola (Figura 18 b) usada na medição [11].

Vareta porta-bola	Recipiente de medição Nº de referência	Alcance de medição parcial, mPas
com marca anular	0,01	4 a 280
	0,1	20a 4.000
sem marca anular	1	200 a 40.000
	10	2.000 a 400.000
	100	20.000 a 4.000.000

Tabela 4 - Escolha da cubeta para medição de viscosidade.

Para a determinação da faixa de viscosidade em que se encontra o óleo a ser ensaiado, foi utilizada uma tabela de óleo de máquina [12] , definindo assim inicialmente a cubeta a ser utilizada.

Neste ensaio foram utilizadas as cubetas 0,01 e 0,1.

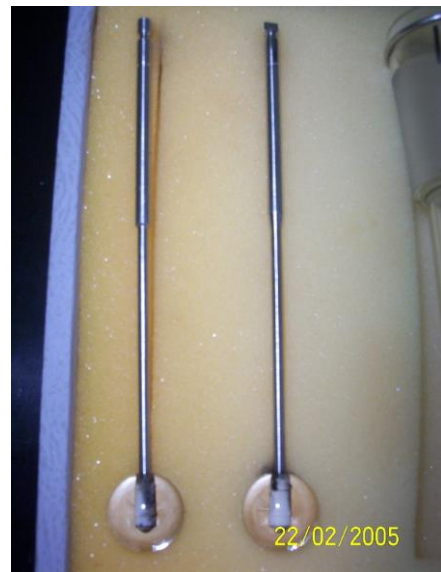


Figura 17 - Cubetas.

Para se omitir o cálculo da flutuação da vareta porta-esfera imergida na amostra de óleo, o braço de alavanca possui uma graduação de 0,5 a 2,0 com um pequeno peso deslizante. A graduação corresponde mais ou menos a densidade da amostra (Figura 18 a).



(a)



(b)

Figura 18 - (a) Braço de alavanca graduado, (b) Vareta porta-esfera.

Segundo critério de operação [11], foi obtido os seguintes resultados utilizando as amostras de óleo novo e usado.

Óleo Lubrax Top Turbo 15W40 Novo:

MEDIÇÃO DE VISCOSIDADE T=40°C					
Medição		M(g/cm²)			
		10	20	40	80
1	t(s)	103,26	49,87	24,88	12,26
2		102,02	49,83	24,76	12,26
3		102,19	49,75	24,74	12,26
4		101,98	49,70	24,66	12,25
5		102,04	49,66	24,72	12,27
t médio		102,30	49,76	24,75	12,26
A (g/cm²)		-0,3607			
(a + M).t (s.g/cm²)		986,08111	977,29085	981,15195	976,37782

Média	980,22543	(s.g/cm²)
K	0,097134	(mPa.cm²/g)
μ	95,21	(mPa.s) (viscosidade dinâmica)
ρ	0,872	(g/cm³) (densidade)
ν	109,19	(cSt) (viscosidade cinemática)
ref.	107,20	(cSt) (viscosidade cinemática de referência)
dif.	1,9 %	

Tabela 5 - Medição de viscosidade do óleo novo à 40°C.

MEDIÇÃO DE VISCOSIDADE T=50°C					
Medição		M(g/cm²)			
		10	20	40	80
1	t(s)	64,32	31,43	15,65	7,73
2		64,44	31,50	15,72	7,76
3		64,45	31,59	15,66	7,77
4		64,12	31,49	15,66	7,74
5		64,15	31,52	15,64	7,73
t médio		64,30	31,51	15,67	7,75
A (g/cm²)		-0,3607			
(a + M).t (s.g/cm²)		619,76843	618,75579	620,98927	616,88602

Média	619,09988	(s.g/cm²)
K	0,097134	(mPa.cm²/g)
μ	60,14	(mPa.s) (viscosidade dinâmica)
ρ	0,866	(g/cm³) (densidade)
ν	69,44	(cSt) (viscosidade cinemática)

Tabela 6 - Medição de viscosidade do óleo novo à 50°C.

MEDIÇÃO DE VISCOSIDADE T=60°C					
Medição		M(g/cm²)			
		50	70	90	120
1	t(s)	188,60	134,51	104,67	78,35
2		188,67	135,22	104,54	78,38
3		188,36	135,50	104,78	77,81
4		188,54	135,49	104,38	78,35
5		189,17	134,27	104,32	78,06
t médio		188,67	135,00	104,54	78,19
A (g/cm²)		0,375			
(a + M).t (s.g/cm²)		9504,1505	9500,4843	9447,6218	9412,1213

Média	9466,0944	(s.g/cm²)
K	0,004289	(mPa.cm²/g)
μ	40,60	(mPa.s) (viscosidade dinâmica)
ρ	0,860	(g/cm³) (densidade)
ν	47,21	(cSt) (viscosidade cinemática)

Tabela 7 - Medição de viscosidade do óleo novo à 60°C.

MEDIÇÃO DE VISCOSIDADE T=70°C					
Medição		M(g/cm²)			
		50	70	90	120
1	t(s)	130,23	93,93	73,12	54,25
2		130,77	93,22	72,83	54,16
3		131,60	93,03	72,95	54,53
4		131,53	93,60	72,73	54,56
5		131,63	94,05	72,92	54,63
t médio		131,15	93,57	72,91	54,43
A (g/cm²)		0,375			
(a + M).t (s.g/cm²)		6606,782	6584,7073	6589,2413	6551,5298

Média	6583,0651	(s.g/cm²)
K	0,004289	(mPa.cm²/g)
μ	28,23	(mPa.s) (viscosidade dinâmica)
ρ	0,853	(g/cm³) (densidade)
ν	33,10	(cSt) (viscosidade cinemática)

Tabela 8 - Medição de viscosidade do óleo novo à 70°C.

MEDIÇÃO DE VISCOSIDADE T=80°C					
Medição		M(g/cm²)			
		50	70	90	120
1	t(s)	96,23	69,57	53,65	40,15
2		96,99	69,13	53,66	40,08
3		96,76	69,13	53,57	40,05
4		97,12	69,33	53,57	40,13
5		96,68	68,93	53,69	40,16
t médio		96,76	69,22	53,63	40,11
A (g/cm²)		0,375			
(a + M).t (s.g/cm²)		4874,0835	4871,2168	4846,6305	4828,7228

Média	4855,1634	(s.g/cm²)
K	0,004289	(mPa.cm²/g)
μ	20,82	(mPa.s) (viscosidade dinâmica)
ρ	0,847	(g/cm³) (densidade)
ν	24,59	(cSt) (viscosidade cinemática)

Tabela 9 - Medição de viscosidade do óleo novo à 80°C.

Segundo dados fornecidos pelo fabricante, a viscosidade do óleo Lubrax Top Turbo 15W40 possui uma viscosidade de 107,2 cSt a 40 ° C, acarretando uma diferença de 1,9% em relação ao valor obtido com o Rheo-Viscosímetro à mesma temperatura, como pode ser observado na Tabela 5.

Óleo Lubrax Top Turbo 15W40 Usado:

MEDIÇÃO DE VISCOSIDADE T=40°C					
Medição		M(g/cm²)			
		10	20	40	80
1	t(s)	89,72	44,13	21,85	10,92
2		89,60	44,07	21,98	10,90
3		89,18	44,11	21,84	10,88
4		89,41	44,21	21,84	10,86
5		89,50	44,16	21,82	10,97
t médio		89,48	44,14	21,87	10,91
A (g/cm²)		-0,3607			
(a + M).t (s.g/cm²)		862,54384	866,80014	866,75293	868,54621

Média	866,160782	(s.g/cm²)
K	0,097134	(mPa.cm²/g)
μ	84,13	(mPas) (viscosidade dinâmica)
ρ	0,884	(g/cm³) (densidade)
ν	95,17	(cSt) (viscosidade cinemática)
ref.	107,20	(cSt) (viscosidade cinemática)
dif.	-11,2 %	

Tabela 10 - Medição de viscosidade do óleo usado à 40°C.

MEDIÇÃO DE VISCOSIDADE T=45°C					
Medição		M(g/cm²)			
		10	20	40	70
1	t(s)	72,13	35,04	17,63	9,97
2		72,24	35,66	17,61	9,96
3		72,33	35,30	17,57	9,95
4		72,26	35,27	17,54	9,93
5		72,63	35,30	17,54	10,00
t médio		72,32	35,31	17,58	9,96
A (g/cm²)		-0,3607			
(a + M).t (s.g/cm²)		697,0949	693,54224	696,77962	693,74671

Média	695,290865	(s.g/cm²)
K	0,097134	(mPa.cm²/g)
μ	67,54	(mPas) (viscosidade dinâmica)
ρ	0,881	(g/cm³) (densidade)
ν	76,66	(cSt) (viscosidade cinemática)

Tabela 11 - Medição de viscosidade do óleo usado à 45°C.

MEDIÇÃO DE VISCOSIDADE T=50°C					
Medição		M(g/cm³)			
		10	20	40	70
1	t(s)	58,23	28,56	13,95	7,98
2		58,55	28,29	13,97	7,95
3		58,58	28,39	14,00	7,94
4		58,17	28,35	14,05	7,94
5		58,01	28,26	14,06	7,96
t médio		58,31	28,37	14,01	7,95
A (g/cm²)		-0,3607			
(a + M).t (s.g/cm³)		562,0483	557,16694	555,18804	553,91099

Média	557,078568	(s.g/cm²)
K	0,097134	(mPa.cm²/g)
μ	54,11	(mPas) (viscosidade dinâmica)
ρ	0,878	(g/cm³) (densidade)
ν	61,63	(cSt) (viscosidade cinemática)

Tabela 12 - Medição de viscosidade do óleo usado à 50°C.

MEDIÇÃO DE VISCOSIDADE T=55°C					
Medição		M(g/cm²)			
		10	20	40	60
1	t(s)	47,11	23,13	11,36	7,62
2		46,93	23,14	11,37	7,62
3		46,91	23,04	11,37	7,56
4		46,77	22,96	11,36	7,56
5		47,14	22,97	11,37	7,56
t médio		46,97	23,05	11,37	7,58
A (g/cm²)		-0,3607			
(a + M).t (s.g/cm²)		452,7772	452,64659	450,54028	455,04

Média	452,751017	(s.g/cm²)
K	0,097134	(mPa.cm²/g)
μ	43,98	(mPas) (viscosidade dinâmica)
ρ	0,875	(g/cm³) (densidade)
ν	50,26	(cSt) (viscosidade cinemática)

Tabela 13 - Medição de viscosidade do óleo usado à 55°C.

MEDIÇÃO DE VISCOSIDADE T=60°C					
Medição		M(g/cm²)			
		50	70	90	120
1	t(s)	167,43	118,52	92,35	68,99
2		167,30	118,53	92,13	68,99
3		167,63	118,74	92,05	68,72
4		166,99	119,17	92,16	69,23
5		166,84	118,72	92,35	68,92
t médio		167,24	118,74	92,21	68,97
A (g/cm²)		0,375			
(a + M).t (s.g/cm²)		8424,6143	8356,046	8333,298	8302,2638

Média	8354,0555	(s.g/cm²)
K	0,004289	(mPa.cm²/g)
μ	35,83	(mPas) (viscosidade dinâmica)
ρ	0,872	(g/cm³) (densidade)
ν	41,09	(cSt) (viscosidade cinemática)

Tabela 14 - Medição de viscosidade do óleo usado à 60°C.

MEDIÇÃO DE VISCOSIDADE T=65°C					
Medição		M(g/cm²)			
		50	70	90	120
1	t(s)	139,33	99,16	76,93	57,59
2		139,53	99,14	77,17	57,50
3		139,46	99,32	77,29	57,51
4		139,35	99,26	77,12	57,69
5		139,42	99,07	76,81	57,61
t médio		139,42	99,19	77,06	57,58
A (g/cm²)		0,375			
(a + M).t (s.g/cm²)		7023,1818	6980,4963	6964,659	6931,1925

Média	6974,8824	(s.g/cm²)
K	0,004289	(mPa.cm²/g)
μ	29,92	(mPa.s) (viscosidade dinâmica)
ρ	0,869	(g/cm³) (densidade)
ν	34,42	(cSt) (viscosidade cinemática)

Tabela 15 - Medição de viscosidade do óleo usado à 65°C.

MEDIÇÃO DE VISCOSIDADE T=70°C					
Medição		M(g/cm²)			
		50	70	90	120
1	t(s)	118,66	84,07	65,20	48,67
2		118,84	84,28	65,29	48,72
3		119,18	84,39	65,73	48,90
4		119,67	84,24	65,24	48,91
5		118,86	84,16	65,47	48,93
t médio		119,04	84,23	65,39	48,83
A (g/cm²)		0,375			
(a + M).t (s.g/cm²)		5996,7408	5927,5455	5909,2598	5877,4298

Média	5927,7439	(s.g/cm²)
K	0,004289	(mPa.cm²/g)
μ	25,42	(mPa.s) (viscosidade dinâmica)
ρ	0,866	(g/cm³) (densidade)
ν	29,36	(cSt) (viscosidade cinemática)

Tabela 16 - Medição de viscosidade do óleo usado à 70°C.

MEDIÇÃO DE VISCOSIDADE T=75°C					
Medição		M(g/cm²)			
		50	70	90	120
1	t(s)	99,69	70,67	55,60	41,15
2		99,86	70,70	55,13	41,02
3		98,92	71,52	55,38	41,10
4		99,33	70,74	54,95	41,17
5		100,05	71,52	55,40	41,12
t médio		99,57	71,03	55,29	41,11
A (g/cm²)		0,375			
(a + M).t (s.g/cm²)		5015,8388	4998,7363	4997,0145	4948,857

Média	4990,1116	(s.g/cm²)
K	0,004289	(mPa.cm²/g)
μ	21,40	(mPa.s) (viscosidade dinâmica)
ρ	0,863	(g/cm³) (densidade)
ν	24,80	(cSt) (viscosidade cinemática)

Tabela 17 - Medição de viscosidade do óleo usado à 75°C.

MEDIÇÃO DE VISCOSIDADE T=80°C					
Medição		M(g/cm²)			
		50	70	90	120
1	t(s)	84,51	59,93	46,42	34,73
2		83,73	60,19	46,52	34,76
3		83,94	59,94	46,27	34,69
4		84,03	59,76	46,49	34,66
5		83,94	59,69	46,60	34,76
t médio		84,03	59,90	46,46	34,72
A (g/cm²)		0,375			
(a + M).t (s.g/cm²)		4233,01 13	4215,6033	4198,8225	4179,42

Média	4206,7143	(s.g/cm²)
K	0,004289	(mPa.cm²/g)
μ	18,04	(mPa.s) (viscosidade dinâmica)
ρ	0,860	(g/cm³) (densidade)
ν	20,98	(cSt) (viscosidade cinemática)

Tabela 18 - Medição de viscosidade do óleo usado à 80°C.

Comparando os resultados das amostras de óleo no estado novo e usado a 40°C, nota-se que após o uso, o óleo tem uma queda de viscosidade que varia em torno de 11,2%, como mostrado na Tabela 10.

Com esses resultados foi plotada a curva de viscosidade dinâmica e cinemática das amostras do óleo, conforme Figuras 19 e 20.

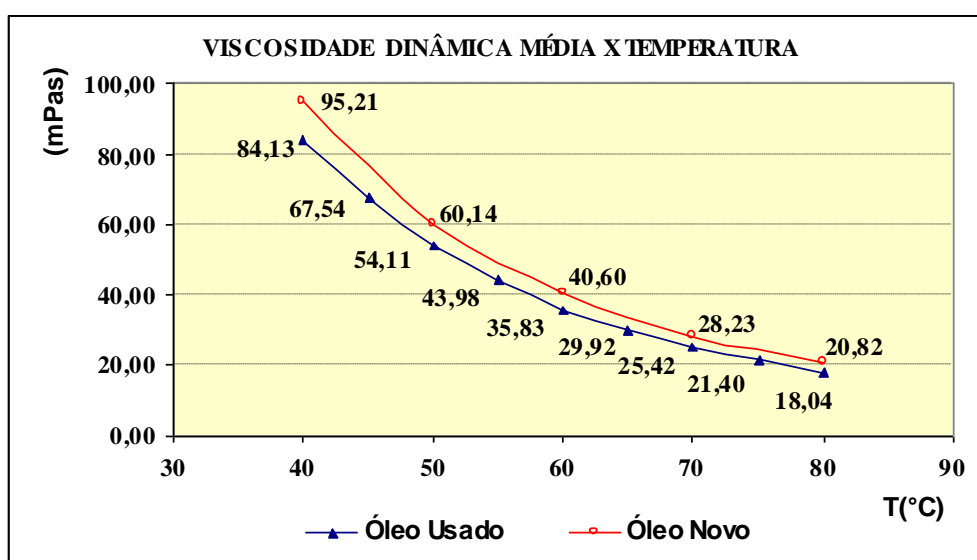


Figura 19 - Gráfico da Viscosidade Dinâmica x Temperatura.

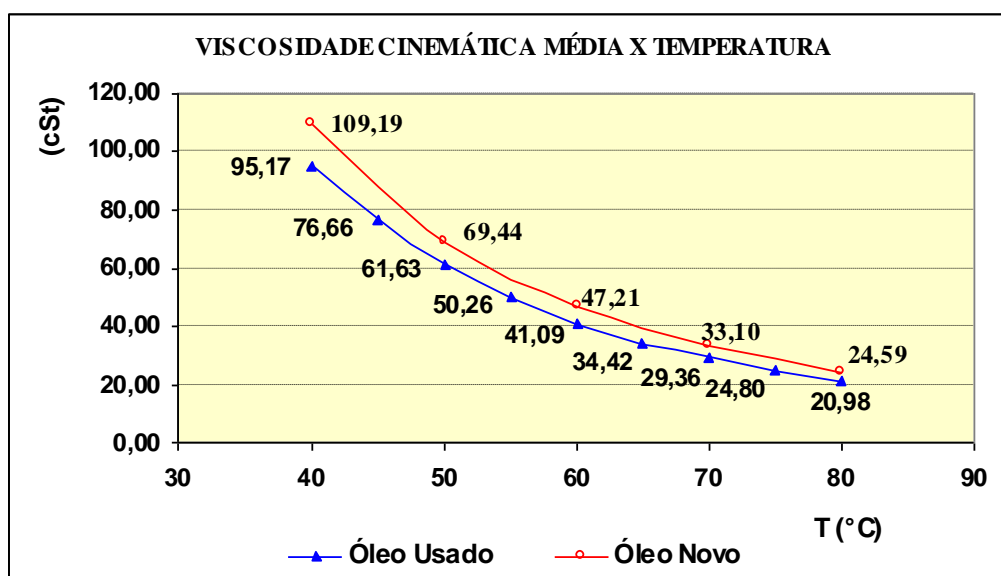


Figura 20 - Gráfico da Viscosidade Cinemática x Temperatura.

c) Análise Comparativa entre os Métodos:

Para efeito comparativo, foi realizado o ensaio à temperatura ambiente utilizando o Rheo-Viscosímetro, com intuito de averiguar a veracidade da análise feita com a proveta de 1000ml.

Comparando o resultado obtido com o Rheo-Viscosímetro (Tabela 19) com o resultado obtido através do uso da proveta, mostrado na Tabela 2, foi comprovado que seria uma medição com uma discrepância muito grande se tomada como verdadeira, no caso do uso da proveta, para o óleo Lubrax Top Turbo 15W40.

MEDIÇÃO DE VISCOSIDADE T=22°C					
Medição		M (g/cm²)			
		30	50	70	100
1	t(s)	91,51	53,64	37,92	26,23
2		90,66	53,61	37,92	26,21
3		90,66	53,56	37,93	26,19
4		90,24	53,52	37,92	26,17
5		90,10	53,46	37,88	26,17
t médio		90,63	53,56	37,91	26,19
A (g/cm²)		-0,3607			
(a + M).t (s.g/cm²)		2686,3283	2658,5816	2640,3044	2609,9518

Média	2648,7915	(s.g/cm ²)
K	0,097134	(mPa.cm ² /g)
μ	257,29	(mPa.s) (viscosidade dinâmica)
ρ	0,882	(g/cm ³) (densidade)
ν	291,71	(cSt) (viscosidade cinemática)

Tabela 19 - Medição óleo novo com Rheo-Viscosímetro a 22° C.

O resultado mostra que o ensaio realizado com a proveta apresentou uma diferença percentual de 187,64% em relação ao resultado obtido com o uso do Rheo-Viscosímetro, provando que o método utilizando a proveta apresenta um alto índice de erro, visto que a incerteza do Rheo-Viscosímetro é de 3%.

3.2.3.3 Conclusão

Com o uso do Rheo-Viscosímetro, os valores obtidos da viscosidade foram compatíveis com o óleo testado, apresentando uma margem de incerteza de 3% que poderá incorrer em um dimensionamento mais preciso desde que os cálculos estejam corretos.

3.3 Ensaio de Poder Calorífico

3.3.1 Poder Calorífico

Por definição, poder calorífico, ou PC, é a quantidade de calor que a combustão de 1Kg do combustível considerado pode fornecer.

Distingui-se dois valores de PC:

- Poder Calorífico Superior ou PCS é a quantidade de calor expressa em Kcal que libera a combustão completa de 1kg de combustível seco, sendo a água proveniente da combustão do hidrogênio condensada ao estado líquido. O PCS é medido através dos calorímetros de jaqueta isotérmica.
- Poder Calorífico Inferior ou PCI, mesma definição anterior (PCS), porém neste caso a água permanece no estado de vapor.

PCS estabelece bem o potencial teoricamente contido no combustível, porém na prática em processos industriais a água permanece no estado de vapor, então o PCI fornece uma idéia mais exata do calor liberado do combustível.

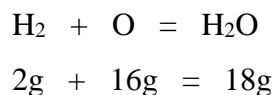
Portanto, na prática, deve-se adotar o PCI, porém como não existe instrumento que forneça o PCI, este deve ser estimado.

Por convenção, é suficiente deduzir do PCS, tantas vezes 600 Kcal quantos Kg de hidrogênio existirem em 1Kg de combustível, logo o PCI de um combustível é dado pela fórmula:

$$PCI = PCS - 600E \quad \text{onde,} \quad (1)$$

E = peso do vapor de água presente nos gases da combustão de 1Kg do combustível e calculado em Kg.

A combustão do hidrogênio efetua-se de acordo com a reação:



O peso da água formada é igual a 9 vezes o peso do hidrogênio. Portanto, para um combustível seco, obtém-se $E = 9H$.

H = peso do hidrogênio entrando na composição de 1Kg do combustível.

Substituindo em (1) temos,

$$PCI = PCS - 5400H$$

Esta fórmula aplica-se apenas a um combustível seco. Para um combustível úmido, é preciso levar em conta também a água de umidade que então se acrescenta a água formada [13].

$$PCI = \left[PCS(bs) - \frac{9 \cdot H}{100} \cdot Q_v \right] \cdot \left[1 - \frac{U}{100} \right] - \frac{U}{100} \cdot Q_v$$

(bs) = base seca

U = porcentagem de umidade

H = porcentagem de hidrogênio

Q_v = calor latente de vaporização de água

3.3.2 Calorímetro

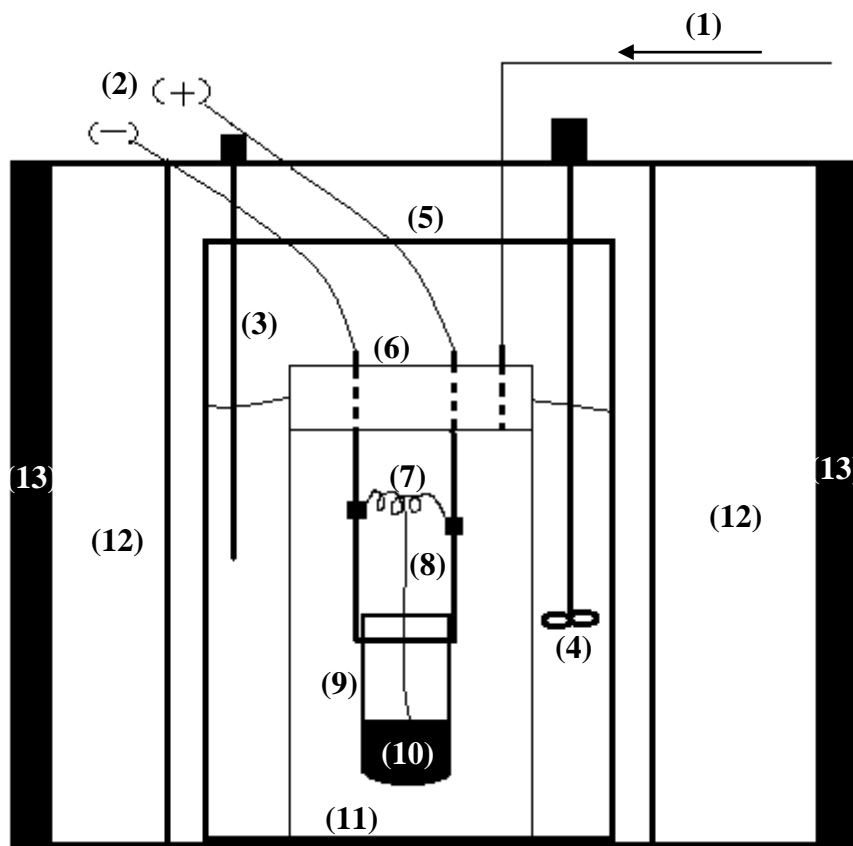
Calorímetro de jaqueta isotérmica (ou isoperibólico) é um aparelho destinado à determinação do poder calorífico superior de um combustível (Figura 21).

A técnica consiste em promover a combustão da amostra a ser testada através de um filamento aquecido em uma câmara de aço inox (bomba calorimétrica) em atmosfera de oxigênio. O calor gerado aumenta a temperatura de uma quantidade conhecida de água contida em um balde metálico. A temperatura é medida em função do tempo e mantida uniforme ao redor da bomba através de um aparelho de agitação [13].



Figura 21 - Calorímetro.

3.3.2.1 Esquema Básico do Calorímetro



- 1 - Entrada de oxigênio; 2 - Ligação elétrica; 3 - Sensor de temperatura; 4 - Agitador;
 5 - Balde metálico (banho calorimétrico) com 2L água destilada; 6 - Bomba calorimétrica;
 7 - Filamento; 8 - Pavio; 9 - Cadinho; 10 - Amostra; 11 - Água de saturação (2 ml);
 12 - Água para isolamento térmico (14 l); 13 - Isolante térmico.

3.3.2.2 Instalação

1. Carregar a camisa isolante com água até o nível máximo possível (aproximadamente 17 litros);
2. Ligar o cabo do instrumento à rede de 110v;
3. Ligar os cabos do registrador e caixa de controles nas tomadas do rack [13].

3.3.2.3 Metodologia de Preparação da Amostra

A quantidade de amostra para ensaio a ser pesada deverá estar entre 1,0 e 1,2g. Também irá depender do poder calorífico da amostra que será prevista razoavelmente com a prática.

Quanto à forma de uso da amostra, ela poderá ser usada solta (moída), em pastilhas ou em pedaço, dependendo da característica da própria amostra.

Amostras como grafite, por exemplo, tem que ser moída, amostras como carvão vegetal é melhor em pedaço, já a de ácido benzóico deve ser compactada [13].

3.3.3 Experimento do Poder Calorífico

3.3.3.1 Objetivo

Obtenção do poder calorífico inferior do óleo lubrificante Lubrax Top Turbo 15W40 usado e também novo como forma de comparação.

3.3.3.2 Descrição do Experimento

A determinação do poder calorífico inferior do óleo compreendeu as seguintes etapas:

- a) Para viabilizar a realização do teste foram introduzidas melhorias no Laboratório de Geração de Potência (LAGEPOT), onde está localizado o calorímetro, e reforma no próprio equipamento;
- b) Preparação do calorímetro para o ensaio;
- c) Determinação da constante do calorímetro;
- d) Calibragem do equipamento;
- e) Determinação do poder calorífico superior do óleo Lubrax Top Turbo 15W40 usado e novo;
- f) Cálculo do poder calorífico inferior (PCI) do óleo Lubrax Top Turbo 15W40 usado e novo.

a) Melhorias e reformas feitas no laboratório e no equipamento:

- Local adequado para permanência do aparelho e instalação elétrica apropriada;



Figura 22 - Adequação do local para o Calorímetro.

- Fixação do cilindro de oxigênio para evitar riscos de acidente;



Figura 23 - Fixação do cilindro de oxigênio.

- Reforma do cadinho de quartzo.

Foi realizada a remoção de impurezas com aplicação de ácido clorídrico e sulfúrico e soldagem com plasma para fechamento de uma trinca que havia na lateral do mesmo (Figura 24).

Esses procedimentos foram realizados nos Laboratórios de Química Analítica e no de Física respectivamente.



Figura 24 - Cadinho reformado.

b) Preparação do calorímetro para ensaio:

- Foram colocados aproximadamente 14 litros de água destilada na camisa isolante para possibilitar um isolamento térmico [13];



Figura 25 - Abastecimento da camisa isolante do calorímetro.

- Foi colocado 2Kg de água destilada no balde metálico (banho calorimétrico), que irá receber o calor gerado pela combustão da amostra de onde se originará o gráfico devido a variação de temperatura [13];



Figura 26 - Banho Calorimétrico.

- Preparado filamento de ignição e pavio que irão iniciar a queima da amostra [13];



Figura 27 - Estrutura interna da bomba calorimétrica.

- Foram colocados 3ml de água destilada dentro da bomba calorimétrica para garantir saturação [13];



Figura 28 - Água destilada para saturação.

c) Determinação da constante do calorímetro:

Antes da realização do experimento com a amostra de óleo lubrificante, se fez necessário a realização do experimento com a amostra padrão (ácido benzóico) [13], visto que o calorímetro se encontrava há muito tempo fora de uso, era preciso levantar a constante do aparelho e verificar se não havia nenhuma anomalia no mesmo.

c.1) Preparação da amostra:

- Foram preparadas 5 amostras padrão de ácido benzóico que foram compactadas e pesadas [13], cujos pesos estão apresentados na Tabela 20.

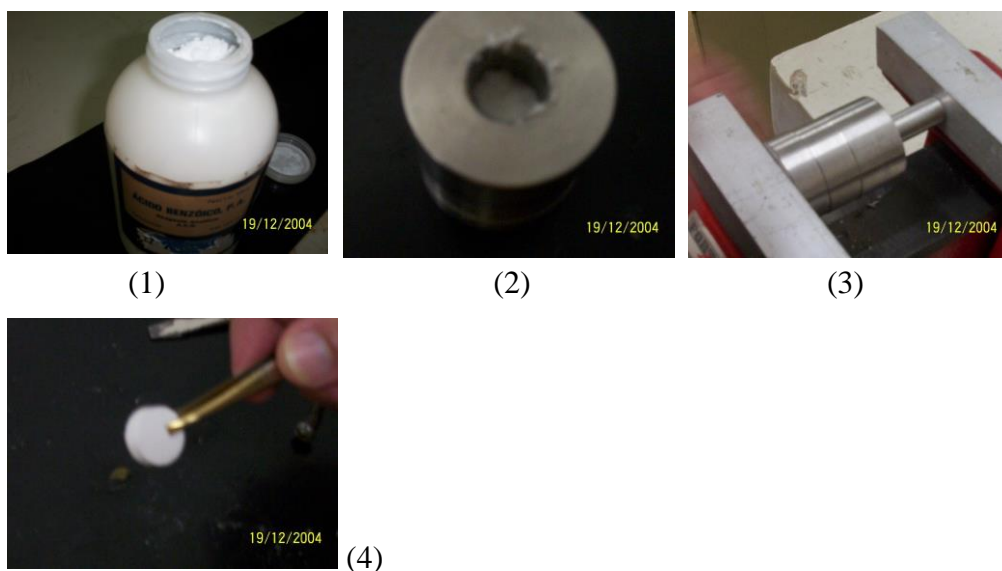


Figura 29 - Seqüência de preparação da amostra de ácido benzóico.

AMOSTRAS	PESO
A1	m1 = 1,1212g
A2	m2 = 0,9980g
A3	m3 = 1,0498g
A4	m4 = 0,9055g
A5	m5 = 1,0388g

Tabela 20 - Amostras de Ácido Benzóico.

- A amostra foi colocada dentro do cadinho e em contato com o pavio e em seguida fechado;



(a)



(b)

Figura 30 - (a) Amostra pronta para queima, (b) Bomba fechada.

- Foi introduzido oxigênio lenta e continuamente até que fosse atingida a pressão de 30 Kgf/cm² [13];

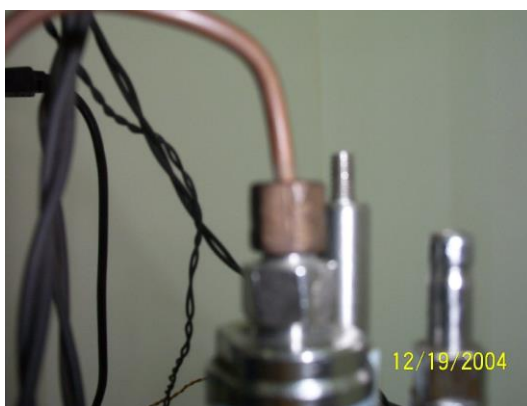


Figura 31 - Introdução de Oxigênio.

- Foi colocada a bomba dentro do balde metálico, conectado os fios para ignição e colocada uma tampa com agitador e sensor de temperatura [13];



Figura 32 - Bomba no interior do banho calorimétrico.

- Foi acionado o agitador para manter a temperatura uniforme ao redor da bomba e acionado o registrador de temperatura;



Figura 33 - Painei do Calorímetro.

- Foi esperado um tempo para que a temperatura se estabilizasse e então foi dada ignição e esperado para que a temperatura voltasse a se estabilizar após a queima [13];

c.2) Metodologia de cálculo:

Determinação da constante “K” do calorímetro:

Através da curva do registrador determinar a variação da “temperatura”, ou seja, o Δmv .

O método para se obter o Δmv é traçar uma tangente pelas curvas, temperatura inicial e final, depois uma perpendicular ao eixo de tempo, buscando igualar as áreas formadas pela interseção das curvas traçadas. O método é ilustrado na Figura 34 [13].

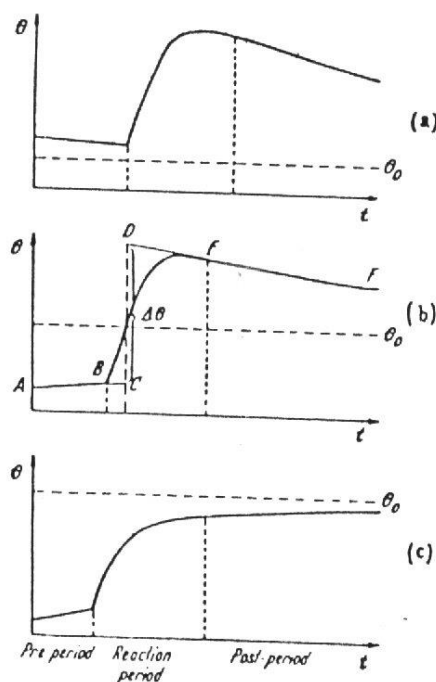


Figura 34 - Curva Calorimétrica.

Encontrado o Δmv pode-se calcular a constante k:

Poder calorífico ácido benzóico 6315 kcal/kg

$$PCS = \frac{Q}{m}, \text{ onde } Q \text{ é o calor liberado e } m \text{ a massa da pastilha}$$

Temos que $Q(\text{liberado}) = Q(\text{recebido})$, logo

$$PCS \cdot m = Q(\text{liberado}) = Q(\text{recebido}) = m_{H_2O} \cdot C_{H_2O} \cdot MV$$

$$\frac{PCS_{ab} \cdot m_{ab}}{\Delta m_{vab}} = m_{H_2O} \cdot C_{H_2O} = K, \text{ onde } k \text{ é a constante calorimétrica.}$$

Deve-se fazer pelo menos 3 determinações da constante K [13].

c.3) Metodologia de operação para uma amostra qualquer:

Deve ser realizado a mesma metodologia do ensaio da amostra padrão.

Metodologia de cálculo [13]:

Determinar o Δm_v obtido do ensaio.

Poder calorífico da amostra = PCSa.

$$PCSa = \frac{Q_a}{m_a}, \text{ onde } Q_a = \text{calor liberado pela amostra e } m_a \text{ é a massa da amostra.}$$

$Q(\text{liberado}) = Q(\text{recebido})$, logo

$$\frac{PCSa \cdot m_a}{\Delta m_{va}} = m_{H_2O} \cdot C_{H_2O} = K$$

$$\frac{PCSa \cdot m_a}{\Delta m_{va}} = K, \text{ portanto}$$

$$PCSa = K \cdot \frac{\Delta m_{va}}{m_a}$$

unidades: Kcal/Kg ou

J/g (si)

$$1 \text{ cal} = 4,187 \text{ J}$$

c.4) Resultados obtidos:

Com o procedimento descrito no manual do equipamento [13] e apresentado no item c.2 metodologia de cálculo, obtém-se a curva característica da queima da amostra de ácido benzóico, que pode ser exemplificada segundo o resultado da queima da amostra 1, mostrado na Figura 35.

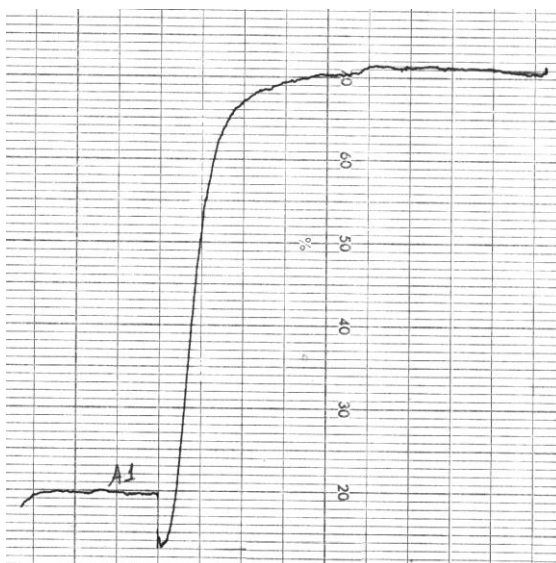


Figura 35 - Curva característica da queima do ác. benzóico.

Seguindo a metodologia de cálculo foram obtidos os seguintes resultados:

AMOSTRAS	PESOS	CONSTANTES
A1	m1 = 1,1212g	K1 = 119,60
A2	m2 = 0,9980g	K2 = 119,82
A3	m3 = 1,0498g	K3 = 119,02
A4	m4 = 0,9055g	K4 = 127,07
A5	m5 = 1,0388g	K5 = 136,10

Tabela 21 - Constantes obtidas com a queima das amostras de ácido benzóico.

Constante do aparelho $\bar{K} = \frac{\sum_{i=1}^n K}{n}$, onde n é o número de amostras, logo:

$$\bar{K} = 124,32.$$

c.5) Avaliação dos resultados obtidos:

Analisando-se as curvas geradas pelo registrador e os valores obtidos das constantes, pode-se verificar que estão bem acima do valor esperado, pois em experimentos antecessores a este, também com o intuito de se levantar a constante do equipamento, foram obtidos valores entre 112 e 114 das constantes que foi determinado pelo fabricante. Além disso houve distúrbios nas curvas geradas, provavelmente por oscilações na rede elétrica, acarretando em erros.

De acordo com as observações foram tomadas algumas ações:

AÇÃO	POR QUE?
1 – Realização de uma nova experiência.	Para confirmação dos valores obtidos.
2 – Utilização de estabilizador e filtro de linha.	Para reduzir as oscilações na rede amenizando assim os distúrbios nas curvas dos gráficos gerados.
3 – Secagem da amostra em uma estufa.	Para evitar que a umidade reduza o poder calorífico da amostra mascarando o resultado.

Tabela 22 - Plano de Ação.

c.6) Recálculo da constante do calorímetro:

Com o intuito de confirmar os valores obtidos no experimento anterior, onde foram observadas algumas anomalias no resultado, foram tomadas as medidas para correção das falhas e preparadas 4 amostras (Tabela 23) sendo que a amostra A7 não queimou.

AMOSTRAS	PESO
A6	$m_6 = 1,0892 \text{ g}$
A7	$m_7 = 1,0253 \text{ g}$
A8	$m_8 = 1,0485 \text{ g}$
A9	$m_9 = 1,0250 \text{ g}$

Tabela 23 - 2º Amostragem de Ác. Benzoico.

c.7) Resultados obtidos:

Com a introdução das medidas para amenizar a flutuação da rede, foram alcançadas melhorias na curva de queima das amostras de ácido benzóico, exemplificada segundo a Figura 36, chegando ao resultado conforme Tabela 24.

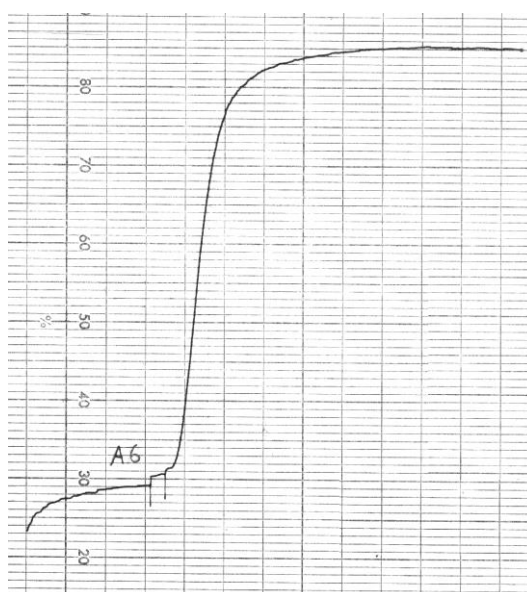


Figura 36 - Curva característica da queima da amostra 6 do ác. benzóico.

A	Massa Úmida (g)	Massa Seca (g)	$\Delta mv (^{\circ}C)$	K
6	1,0892	1,0874	60,0	114,4489
9	1,0250	1,0152	56,8	112,8695
K_{Médio}				113,6592

Tabela 24 - Resultado obtido da constante com a 2ª análise da queima do ác. Benzóico.

Tendo em vista que a amostra A8 ficou fora dos valores esperados, esta foi descartada devido a possível introdução de erro no procedimento de realização do ensaio.

c.8) Avaliação dos resultados obtidos:

Com a aplicação das ações propostas, notou-se uma diminuição dos distúrbios nos gráficos devido a oscilações na rede, diminuindo com isso o risco de erros de leitura e também pode-se notar uma diminuição das constantes que ficou dentro do valor esperado.

d) Calibragem do calorímetro:

Com o objetivo de determinar a incerteza na medida do equipamento, foram realizadas análises com a grafite ultrapuro (99,9995%) com PCS de 7830 Kcal/kg (Figura 37).

Com a grafite moída, foram preparadas 3 amostras, sendo que uma não queimou.



(a)



(b)

Figura 37 - (a) Grafite na forma de bastão, (b) Grafite em pó.

d.1) Resultado obtido:

Com a queima da grafite foi obtida a seguinte tabela:

A	Massa (g)	$\Delta mv (^{\circ}C)$	PCS (kcal/kg)
1	1,0431	69,0	7518
2	1,0012	68,0	7720
PCS Médio			7619
PCS Padrão			7830
Diferença			-2,69%

Tabela 25 - Resultado da análise do grafite.

A tabela 25 mostra uma incerteza de 2,69 % na medição do PCS da grafite.

Como a incerteza foi pequena, a constante do equipamento definida com a queima do ácido benzóico está com boa precisão.

e) Determinação do poder calorífico superior do óleo Lubrax Top Turbo 15W40 usado e novo:

Utilizando o mesmo procedimento [13] e considerando o percentual de incerteza apresentado na Tabela 25, foram realizados os ensaios com amostras de óleo lubrificante Lubrax Top Turbo 15W40 novo e usado e alcançado os resultados de poderes caloríficos superiores mostrados nas Tabelas 26 e 27, respectivamente.

Óleo Novo			
A	Massa (g)	Dmv (°C)	PCS (kcal/kg)
1	1,0051	87,8	9929
2	1,0014	88,0	9988
3	1,0073	88,0	9930
PCS Médio			9949

Tabela 26 - Resultado da análise de PCS do óleo novo.

Óleo Usado			
A	Massa (g)	Dmv (°C)	PCS (kcal/kg)
1	1,0090	87,2	9823
2	1,0059	86,0	9717
3	1,0056	84,2	9517
4	1,0292	85,5	9442
PCS Médio			9625

Tabela 27 - Resultado da análise de PCS do óleo usado.

Percebe-se que o valor de PCS do óleo após ser usado, tem uma redução de 3,26% do seu valor quando novo, o que indica que mesmo após seu uso ele não perdeu esta característica. O que também foi notado durante a queima foi à geração de quantidades quase imperceptíveis de cinza, o que demonstra que este óleo tem uma queima limpa.

As curvas características da queima do óleo tanto usado quanto novo, estão mostradas na Figura 38.

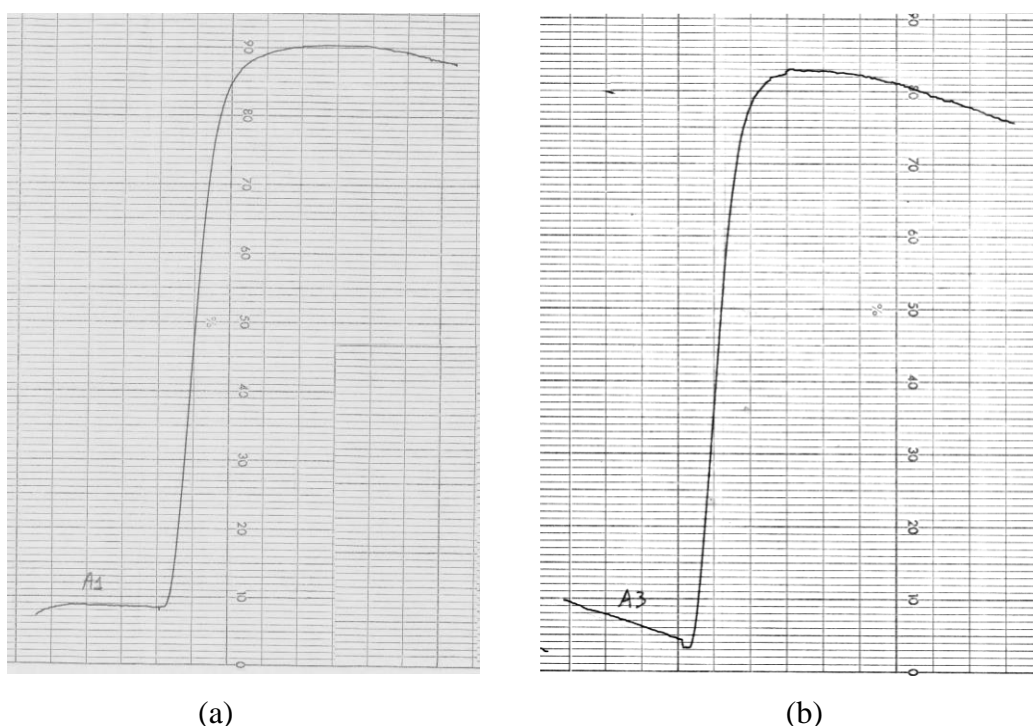


Figura 38 - Curvas características da queima dos óleos (a) Usado, (b) Novo.

f) Cálculo do poder calorífico inferior (PCI) do óleo Lubrax Top Turbo 15W40 usado e novo:

Para se definir o poder calorífico inferior do óleo Lubrax Top Turbo 15W40 é necessário que seja definida a quantidade de hidrogênio contida no mesmo [13]. Essa análise não foi possível ser feita, pois não havia equipamentos à disposição que fizessem a medida do teor de hidrogênio.

Para definição do PCI foi utilizado então o critério empírico de determinar o percentual de variação entre os valores de PCS e PCI de outros óleos de mesma natureza parafínica, segundo orientação, conforme a Tabela 27 [14].

Hidrocarboneto	PCS (KJ/Kg)	PCI (KJ/Kg)	$\frac{PCI}{PCS}$
Propano	49973	45982	92,0%
n-Butano	49130	45344	92,3%
n-Pentano	48643	44983	92,5%
n-Hexano	48308	44733	92,6%
n-Heptano	48071	44557	92,7%
n-Octano	47893	44425	92,8%
n-Decano	47641	44239	92,9%
n-Duodecano	47470	44109	92,9%
n-Cetano	47300	44000	93,0%
Média			92,6%

Tabela 28 - Dados de PCS e PCI de alguns hidrocarbonetos parafínicos a 25° C.

O resultado mostra que o PCI é em média 92,63% do PCS, logo se pode definir o PCI do óleo lubrificante usado e novo através dessa metodologia.

A fórmula utilizada será:

$$PCI = 0,9263 \times PCS$$

Logo o PCI do óleo Lubrax Top Turbo 15W40 será:

- Óleo Novo

$$PCI = 0,9263 \times 9949$$

$$PCI = 9215,8 \text{ Kcal/Kg}$$

- Óleo Usado

$$PCI = 0,9263 \times 9625$$

$$PCI = 8915,6 \text{ Kcal/Kg}$$

3.3.3.3 Conclusão

O ensaio do poder calorífico do óleo Lubrax Top Turbo 15W40 usado mostra que seu valor é maior que duas vezes o da madeira, que apresenta poder calorífico de 4000 Kcal/Kg, o que prova que o óleo possui maior eficiência energética, sendo, então, melhor combustível para o processo de queima.

3.4 Ensaio do Ponto de Fulgor

3.4.1 Ponto de Fulgor

O ponto de fulgor é a temperatura mínima na qual um líquido é suficientemente vaporizado para criar uma mistura vapor-ar, que se inflamará se houver ignição.

O ponto de fulgor de produtos derivados do petróleo varia dentro de uma larga faixa de temperatura, por isto normalmente o laboratório de análise lança mão, geralmente, de três tipos de aparelhos para determinação do ponto de fulgor:

- O aparelho TAG de copo fechado;
- Aparelho Pensky Martens de copo fechado;
- Aparelho de copo aberto denominado Cleveland Open Cup (COC).

Todos eles funcionam segundo o mesmo princípio básico.

Para substâncias combustíveis e inflamáveis, isto é, substâncias de ponto de fulgor abaixo de 70° C, usa-se aparelho TAG copo fechado ou o Pensky Martens.

Para produto de ponto de fulgor acima de 70° C usa-se o aparelho Cleveland Open Cup (Figura 39). Em lubrificantes, por exemplo, é praticamente o único usado [15].

3.4.2 Cleveland Open Cup (COC)

Sua operação consiste em colocar a amostra a ser medida na cuba e aquecê-la partindo de uma temperatura de cerca de 38° C daquela do ponto de fulgor. A cada aumento de 15° C na temperatura, deve-se passar uma chama piloto sobre a cuba. O teste do ponto de fulgor é completado quando a chama piloto produz uma inflamação temporária na porção da amostra vaporizada (Figura 39) [15].

Continuando a operação, quando a chama produzida permanecer por 5 segundos ou mais, o ponto de inflamação será atingido. O ponto de inflamação encontra-se $\pm 10^{\circ}\text{C}$ acima do ponto de fulgor [7].

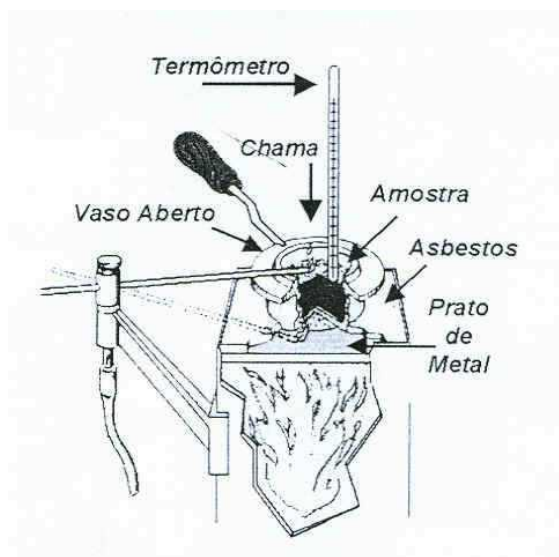


Figura 39 - Representação esquemática de ponto de fulgor com método COC.

3.4.3 Experimento do Ponto de Fulgor

3.4.3.1 Objetivo

A determinação da temperatura do ponto de fulgor do óleo Lubrax Top Turbo 15W40 usado tem como objetivo definir a temperatura mínima necessária para a partir da qual se garanta a sua queima, já que a temperatura de início de combustão está geralmente 10° C acima da temperatura do ponto de fulgor.

3.4.3.2 Descrição do Experimento

A tecnologia empregada para o ensaio de ponto do fulgor do óleo usado foi fornecida pelo laboratório de análise de óleo da oficina de locomotivas pertencente à Companhia Vale do Rio Doce, situada em Tubarão - Vitória. O ensaio foi realizado em aparelho Cleveland de Copo Aberto.

O resulta foi o seguinte:

- Óleo Lubrax Top Turbo 15W40 Usado:

Ponto de fulgor (CVRD): 242 °C.

Segundo dado comercial:

- Óleo Lubrax Top Turbo 15W40 Novo:

Ponto de fulgor (BR): 230°C.

Uma provável explicação para este aumento depois de usado seria devido a quantidade de impurezas contida no óleo, adquiridas com o seu uso.

3.4.3.3 Conclusão

De acordo com o resultado, é factível a queima do óleo Lubrax Top Turbo 15W40 usado, pois nesta temperatura é possível a ignição do mesmo, até por um simples palito de fósforo.

3.5 Ensaio de Partículas Magnéticas

3.5.1 Objetivo

Verificar a presença de partículas ferromagnéticas contidos no óleo que possam a vir obstruir o queimador. Além disso, este ensaio nos indica, qualitativamente, o desgaste dos motores de onde foi retirada a amostra de óleo.

3.5.2 Descrição do Experimento

A análise consistiu em tomar um ímã, uma superfície lisa e nesta foi colocada uma quantidade pequena da amostra do óleo.



Figura 40 - (a) Superfície Lisa, (b) Ímã.

A superfície contendo a amostra, foi arrastada por sobre o ímã.

Se houver deslocamento da amostra de óleo no sentido contrário da superfície deduz-se que há partículas magnéticas.

3.5.3 Conclusão

Ao mover a superfície sobre o ímã, a amostra de óleo não se deslocou, o que pode indicar que as partículas resultantes do desgaste dos motores, estão na forma de óxido não magnético.

3.6 Ensaio do Teor de Sólidos

3.6.1 Objetivo

Avaliar a quantidade de sólidos contidos no óleo Lubrax Top Turbo 15W40 usado.

3.6.2 Descrição do Experimento

A técnica utilizada foi a de pesagem dos resíduos encontrados após a filtragem da amostra de óleo (Figura 41).

Foi pesada uma amostra de óleo com 56g e um papel de filtro Melita de 1,16g limpo e com a utilização de um recipiente, realizou-se a filtração da mesma.



Figura 41 - Filtração do óleo usado.

Durante o processo de filtração houve absorção do óleo pelas paredes do filtro.



Figura 42 - Absorção do óleo durante filtração

Após a filtração parcial do óleo, fez-se a medição do peso do filtro com os resíduos constando uma massa de 2,188g. Com o peso do filtro antes e depois da filtração, se observou uma retenção de 1,028g o que caracteriza 1,84% de impurezas.

3.6.3 Conclusão

O resultado não foi satisfatório devido o filtro utilizado ser higroscópico, tendo absorvido o óleo, mascarando o resultado. Esse problema poderia não ter ocorrido se o filtro utilizado fosse de outro material, com isso o teor de sólido seria provavelmente abaixo de 1,84%, mas somente com sua aplicação no queimador que se terá uma idéia qualitativa desse percentual.

3.7 Ensaio de Espectrometria

3.7.1 Objetivo

Além dos ensaios fundamentais para caracterização do óleo, o ensaio de espectrometria foi realizado com objetivo de complementação dos estudos.

3.7.2 Descrição do Experimento

A realização deste ensaio se deu no Laboratório de Análise de Óleo da Oficina de Locomotivas da Companhia Vale do Rio Doce, situada em Vitória.

O resultado obtido foi o seguinte em ppm:

Ag: 0, **Al:** 5, **Ca:** 1235, **Cr:** 7, **Cu:** 61, **Fe:** 137, **Mg:** 316, **Mn:** 5, **Na:** 20, **Ni:** 5, **Pb:** 17, **Si:** 18, **Zn:** 650

Sendo que os elementos ferro, silício e cobre apresentaram altos teores não estando dentro dos limites especificados pela CVRD. Essa análise mostra que há, segundo a CVRD, um desgaste excessivo dos componentes internos do motor e contaminação por poeira.

3.7.3 Conclusão

Pela presença de ferro na amostra este ensaio veio a confirmar que o mesmo está na forma de óxido Fe_2O_3 que não é magnético, validando a suposição feita na conclusão da análise do ensaio de partículas magnéticas.

4 DIMENSIONAMENTO DO QUEIMADOR DE ÓLEO

4.1 Atomizador Tipo y

Para o projeto do queimador de óleo utilizou-se atomizadores do tipo y para nebulização do combustível líquido. Esse tipo de injetor funciona sob o princípio da impressão de uma alta velocidade no fluido auxiliar de atomização sobre o fluido a ser atomizado, que possui baixa velocidade [5].

A Figura 43, mostra um esquema desse tipo de atomizador e suas principais dimensões.

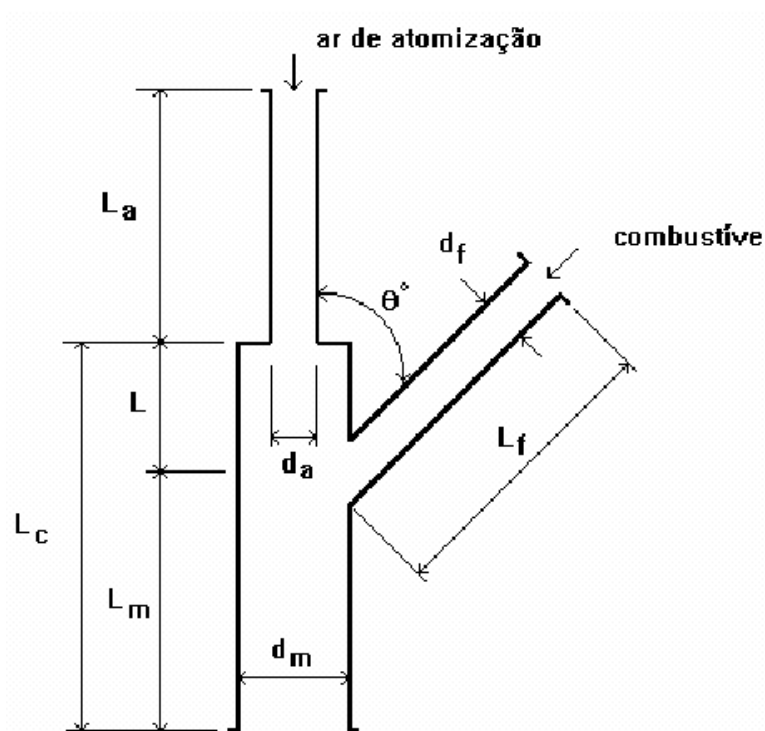


Figura 43 - Representação esquemática do atomizador.

É relevante mencionar que o uso deste tipo de atomizador no presente trabalho deve-se à suas características de promover um fino spray (resultando em um baixo tempo de evaporação das gotas), mesmo em condições que não a de projeto. Além disso, é de fácil construção, requer baixa pressão para o líquido e permite variar o tamanho das gotas do spray sem alterar a vazão de combustível, somente variando a vazão do fluido auxiliar.

Os parâmetros geométricos dos atomizadores foram obtidos baseados na investigação experimental realizada por Mullinger e Chigier (1974). Entre outras coisas, eles determinaram as condições geométricas necessárias para uma pulverização adequada nos injetores tipo y [5].

Essas recomendações estão organizadas na Tabela 29.

Diâmetro de saída do ar (d_a) igual ao diâmetro de saída do combustível (d_f).	$d_a = d_f$
Diâmetro da câmara de mistura (d_m).	$d_m = (1,4 - 1,8) \cdot d_a$
Comprimento de pré-mistura (L).	$L = 0,75 \cdot d_a$
Comprimento de mistura (L_m)	$L_m = (4 - 5) \cdot d_m$
Comprimento total da câmara (L_c)	$L_c = L_m + L$
Comprimento do canal de alimentação do ar (L_a)	$L_a > 2 \cdot d_a$
Comprimento do canal de alimentação do combustível (L_f)	$L_f > 2 \cdot d_f$
Inclinação do canal de alimentação do combustível (θ)	$\theta = 52^\circ$

Tabela 29 - Recomendações para projeto de atomizador tipo y , segundo Mullinger e Chigier (1974).

Além da geometria ideal, Mullinger e Chigier também determinaram a relação entre a vazão mássica do fluido auxiliar de atomização e do líquido, denominada como razão de atomização (r_{atm}). Desta forma, recomendaram que a vazão de fluido auxiliar seja no mínimo 0,1 vezes a vazão do fluido a ser atomizado [5].

$$r_{atm} = \frac{m_{ar}}{m_f} \geq 0,1 \quad (1)$$

Além das recomendações de Mullinger e Chigier, para o projeto dos atomizadores é preciso levar em conta algumas considerações sobre os escoamentos de líquido e gás no seu interior.

As considerações feitas no projeto dos atomizadores estão listadas a seguir.

a) Considerando a passagem do ar de atomização pelo orifício de injeção como um escoamento reversível adiabático unidimensional em regime permanente para gás perfeito,

pode-se fazer uso das equações para este tipo de escoamento, facilitando os cálculos de projeto. Foi adotado, ainda, $Mach = 1$ na passagem do escoamento de ar pelo orifício de injeção e a pressão e a temperatura de estagnação como sendo 3atm e 27 °C, respectivamente.

b) Equacionamento do escoamento de líquido como sendo unidimensional incompressível em regime permanente e coeficiente de descarga igual a 0,75 (também recomendado por Mullinger e Chigier).

Basicamente, o projeto dos atomizadores se resume em encontrar o diâmetro do canal para passagem do ar de atomização e, com esse valor, adequar os demais parâmetros geométricos segundo a Tabela 28 e as facilidades de construção [5].

4.2 Cálculo do Atomizador

O projeto do injetor de óleo lubrificante Lubrax Top Turbo 15W40 usado foi feito admitindo uma vazão ideal de 10L/h [16] para esse combustível e uma temperatura de 30°C para o mesmo. Assim, sua vazão mássica será:

$$mf = \frac{10 \times 1000 (\text{cm}^3) \times 0,890 \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right)}{3600 (\text{s})},$$

sendo 0,890 g/cm³ a densidade do combustível à 30°C (ρ_f) logo;

$$mf = 2,47 \text{ g/s}$$

Utilizando a igualdade na equação 1, a vazão mássica de ar de atomização do combustível será igual a 0,247g/s e admitindo $Mach = 1$ sua velocidade de injeção fica:

$$Var = \sqrt{\gamma \times R \times Tar} \quad (2)$$

Onde:

$$R = 287 \text{ m}^2/\text{s}^2\text{K};$$

$$\gamma = C_p/C_v = 1,4;$$

Tar = temperatura do ar no orifício de injeção, que pode ser calculada pela equação:

$$T_{ar} = \frac{T_o}{\left[1 + \frac{\gamma - 1}{2} \times \text{Mach}\right]} \quad (3)$$

Sendo:

T_o = a temperatura de estagnação, admitida como sendo 300 K;

$\text{Mach} = 1$ (relação entre a velocidade de um fluido sobre a velocidade do som).

Logo, $T_{ar} = 250\text{K}$.

Substituindo o resultado encontrado na equação (2):

$V_{ar} = 316,93 \text{ m/s}$.

- Pressão do ar na saída de injeção:

$$\frac{T_o}{T_{ar}} = \left(\frac{P_o}{P_{ar}}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (4)$$

Sendo P_o a pressão de estagnação do ar, admitida como sendo 3atm. Substituindo os valores:

$P_{ar} = 1,584 \text{ atm} = 160498 \text{ Pa}$.

Assim, pode-se calcular a massa específica do ar de atomização do combustível:

$$\rho_{ar} = \frac{P_{ar}}{R \times T_{ar}} \quad (5)$$

Substituindo os valores:

$\rho_{ar} = 2,24 \text{ Kg/m}^3$.

Finalmente calcula-se o diâmetro do canal de injeção:

$$d_a = \sqrt{\frac{4 \times m_{ar}}{\pi \times \rho_{ar} \times V_{ar}}} \quad (6)$$

Substituindo-se todos os valores:

da = 0,66 mm , e como de acordo com a Tabela 29:

df = 0,66mm. (diâmetro de injeção do combustível)

Com o valor obtido para o diâmetro do canal de saída do ar será possível calcular os demais parâmetros geométricos utilizando as relações apresentadas na Tabela 29.

- Pressão de injeção do combustível:

$$P_f = \left(\frac{m_f}{C_d \times \frac{\pi}{4} \times d_f^2} \right)^2 \times \frac{1}{2 \times \rho_f} \quad (7)$$

Logo: $P_f = 50253,997 \text{ Pa} = 0,495968 \text{ atm}$.

Com isso é possível calcular a velocidade de injeção do combustível na câmara de mistura:

$$V_f = \left(\frac{2 \times P_f}{\rho_f} \right)^{1/2} \times C_d \quad (8)$$

Assim, $V_f = 10,63 \text{ m/s}$.

Como foi dito no item 1.4, é considerado, como eficiente, uma atomização que pulverize gotículas com diâmetro médio menores que $100\mu\text{m}$, sendo $60\mu\text{m}$ o ideal [5].

Para se fazer essa averiguação, será usada a fórmula de Wigg (9) [5], que calcula o diâmetro mediano de massa (MMD) em μm para atomizadores desse tipo:

$$\text{MMD} = \frac{200 \times \delta^{0,5} \times m_f^{0,1} \times \left(1 + \frac{1}{r_{\text{atm}}} \right)^{0,5} \times h_m^{0,1} \times \tau^{0,2}}{\rho_{\text{ar}}^{0,3} \times V_{\text{rel}}} \quad (9)$$

Onde δ é a viscosidade cinemática do combustível (centistokes), m_f a vazão mássica do combustível (g/s), m_{ar} a vazão mássica do fluido de atomização (g/s), h_m o raio da câmara de mistura (cm), τ a tensão superficial do combustível (36,5 dynas/cm [17]), ρ_{ar} a densidade do fluido de atomização (g/cm³) no ponto de mistura e V_{rel} a velocidade relativa entre os fluxos (m/s).

Fazendo as substituições na equação 9 tem-se:

$$MMD = 309,30 \mu m.$$

4.3 Comentário dos Resultados

Tendo em vista que a exigência do projeto para o diâmetro de injeção do combustível (d_f) seja maior que 0,8 mm e que o diâmetro médio de massa (MMD) seja menor que 100 μm [5], os resultados alcançados não foram satisfatórios.

Para se chegar a um dimensionamento ótimo, foi necessário, utilizando o mesmo procedimento de cálculo, determinar novos parâmetros dimensionais, variando a vazão e a temperatura de combustível, a razão de atomização do ar/combustível e a temperatura de entrada do ar (Tabela 30).

m_f (l/h)	10	m_{ar} (g/s)	d_{ar} (mm)	d_f (mm)	d_m (mm)	P_f (Pa)	V_f (m/s)	V_{rel}	MMD (μm)
T_f	m_f (g/s)								
30°C	2,4722	0,3708	0,82	0,82	1,47	22335,110	7,08	309,85	260,49
35°C	2,4639	0,3696	0,81	0,81	1,47	22410,651	7,11	309,83	227,29
40°C	2,4556	0,3683	0,81	0,81	1,46	22486,706	7,13	309,81	188,12
45°C	2,4472	0,3671	0,81	0,81	1,46	22563,278	7,16	309,78	168,77
50°C	2,4389	0,3658	0,81	0,81	1,46	22640,373	7,18	309,76	151,26
55°C	2,4306	0,3646	0,81	0,81	1,46	22717,998	7,21	309,73	136,53
60°C	2,4222	0,3633	0,81	0,81	1,45	22796,156	7,23	309,71	123,40
65°C	2,4139	0,3621	0,81	0,81	1,45	22874,854	7,26	309,68	112,89
70°C	2,4056	0,3608	0,80	0,80	1,45	22954,097	7,28	309,66	104,22
75°C	2,3972	0,3596	0,80	0,80	1,45	23033,891	7,31	309,63	95,74
80°C	2,3889	0,3583	0,80	0,80	1,44	23114,242	7,33	309,61	88,02

$ratm$	T_{ar} (°K)	Var (m/s)	Par (Pa)	ρ_{ar} (Kg/m ³)	θ (°)	τ_f (Dynas/cm)
0,15	250,00	316,94	160584,46	2,24	52	36,5

γ	R (m ² /s ² K)	C_d	Mach	T_{oar} (°C)	P_{oar} (atm)
1,4	287	0,75	1	27	3

Tabela 30 - Planilha de dimensionamento do Atomizador.

LEGENDA			
mar	Vazão do ar de atomização	Vf	Vel. de injeção do combustível
dar	Diâmetro de saída do ar	Vrel	Velocidade relativa entre os fluxos
Var	Vel. de injeção de ar	τ_f	Tensão superficial do combustível
Par	Pressão de injeção do ar	dm	Diâmetro da câmara de mistura
mf	Vazão do combustível	MMD	Diâmetro mediano de massa da gota
df	Diâmetro de saída do combustível	ratm	Razão de atomização
Pf	Pressão do combustível	Cd	Coeficiente de descarga
θ	Inclinação do canal de combustível	R	Constante dos gases perfeitos.
Em vermelho são pontos que se pode variar.		Em azul são valores dentro do recomendado	
Em verde são os parâmetros de projeto a serem avaliados			

Com as simulações realizadas chegou-se às seguintes observações:

- Variação da Vazão de Combustível (mf):

Só a variação da vazão de combustível não foi viável porque os valores de MMD e df não ficaram dentro do recomendado simultaneamente.

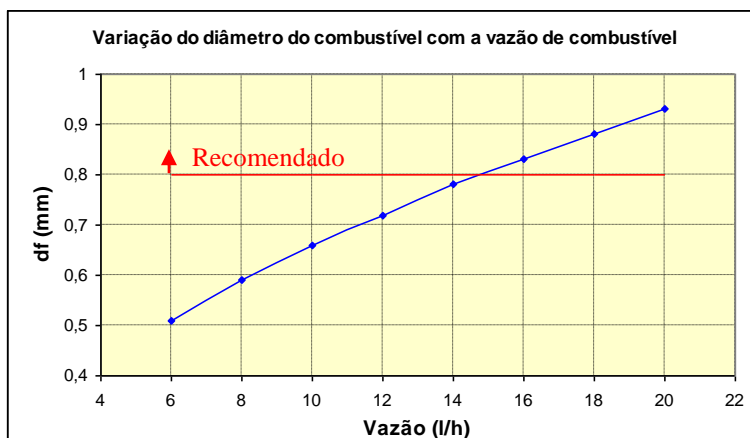


Figura 44 - Gráfico df x mf.

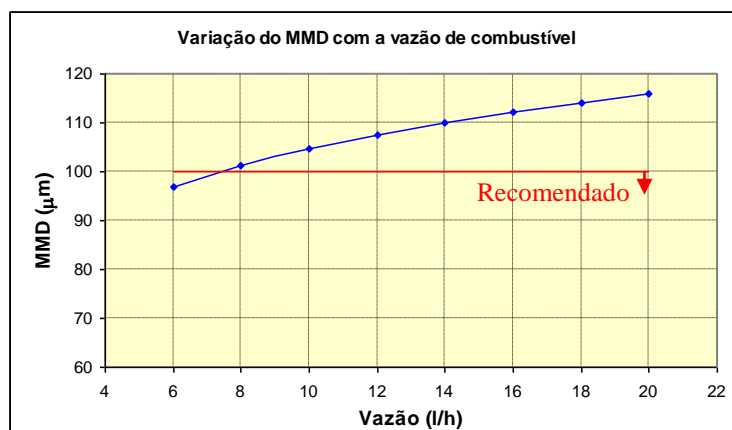


Figura 45 - Gráfico MMD x mf.

- Variação da Temperatura de Combustível (T_f):

O aumento da temperatura do combustível tornou somente o MMD dentro do especificado, sendo necessário para isto valores bem acima de 80°C dependendo da vazão de combustível, não influenciando significativamente contudo no diâmetro do canal de injeção do combustível.

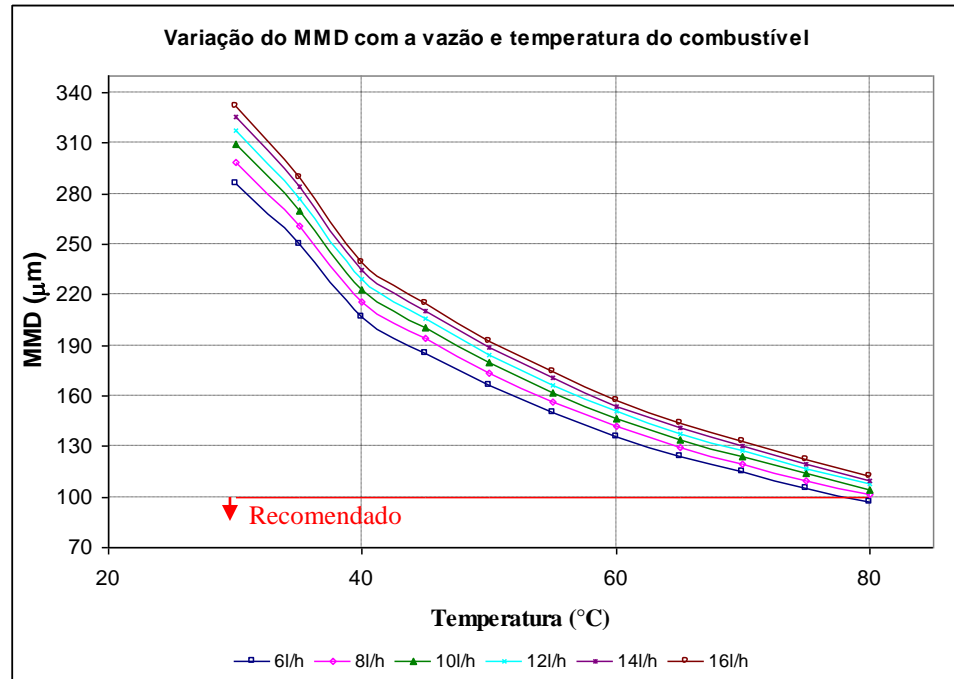


Figura 46 - Gráfico MMD x T_f para algumas vazões de combustível.

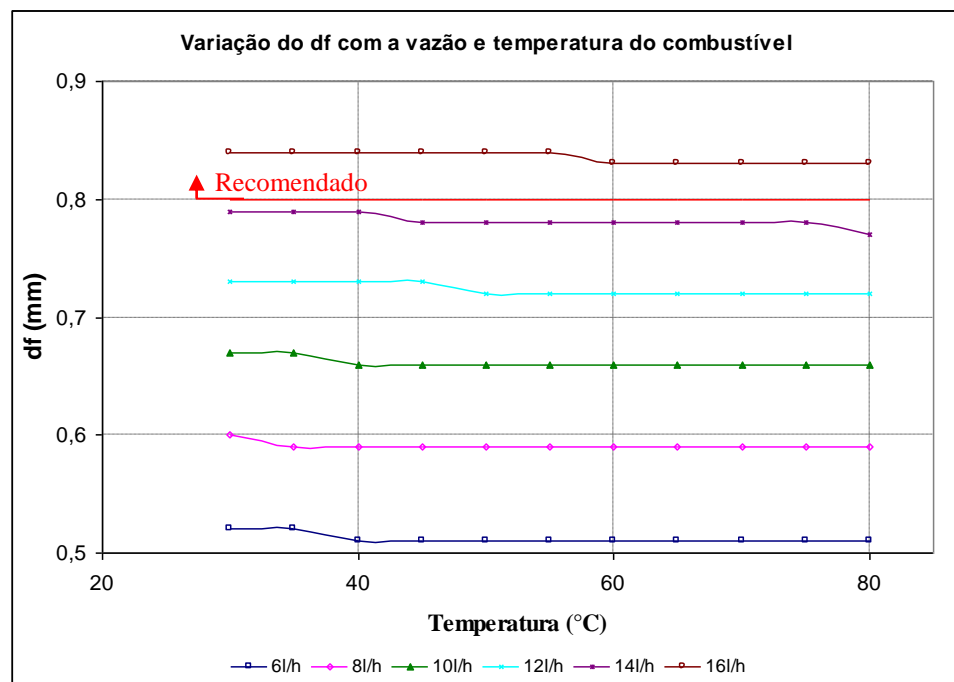


Figura 47 - Gráfico df x T_f para algumas vazões de combustível.

- Variação da Temperatura do Ar de Atomização (T_{oar}):

Verificou-se que seria necessário um aumento muito grande da temperatura de injeção do ar para que os parâmetros de projeto ficassem dentro do recomendado, acarretando num aumento do custo do projeto, visto que seria necessária a utilização de um trocador de calor para este fim.

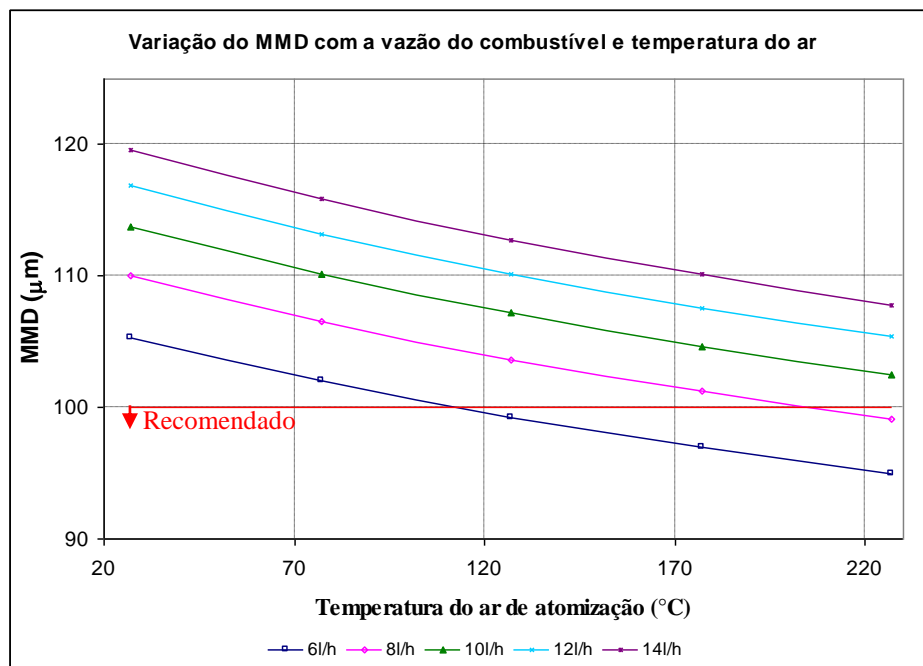


Figura 48 - Gráfico MMD x T_{oar} para algumas vazões de combustível.

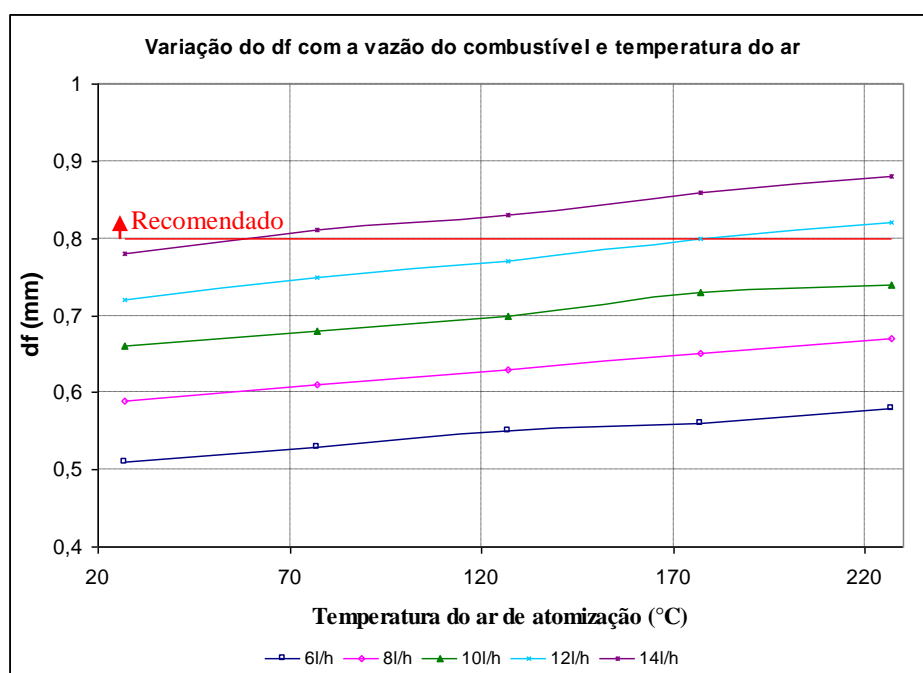


Figura 49 - Gráfico df x T_{oar} para algumas vazões de combustível.

- Variação da Razão de Atomização ($ratm$):

Com a mudança da razão de atomização, alterando com isto a vazão de entrada de ar de atomização, mostrou que um valor acima de 0,15 seria viável, pois deixou os parâmetros de projeto dentro do especificado, além de ser mais barato em relação ao aquecimento do ar de atomização.

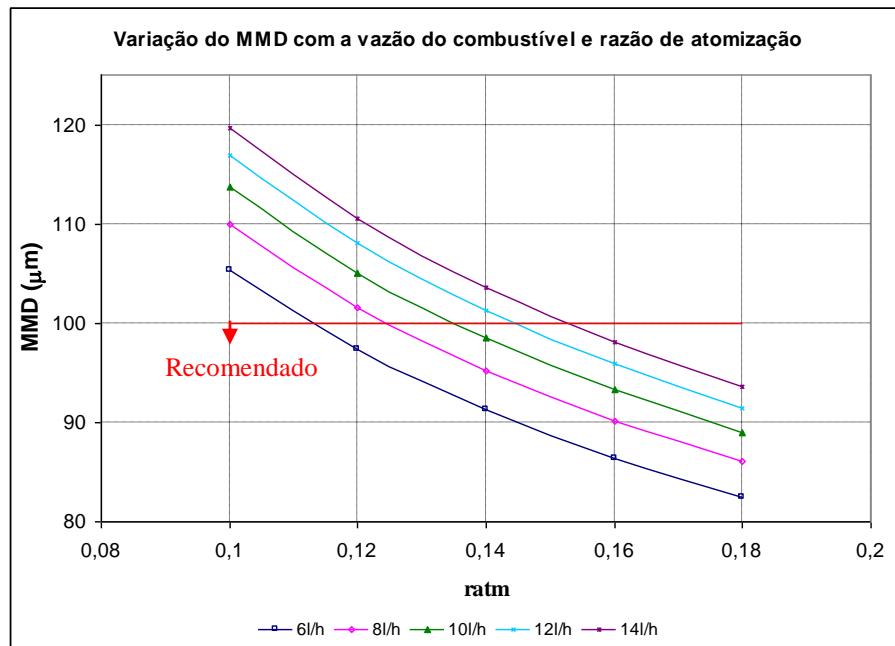


Figura 50 - Gráfico MMD x $ratm$ para algumas vazões de combustível.

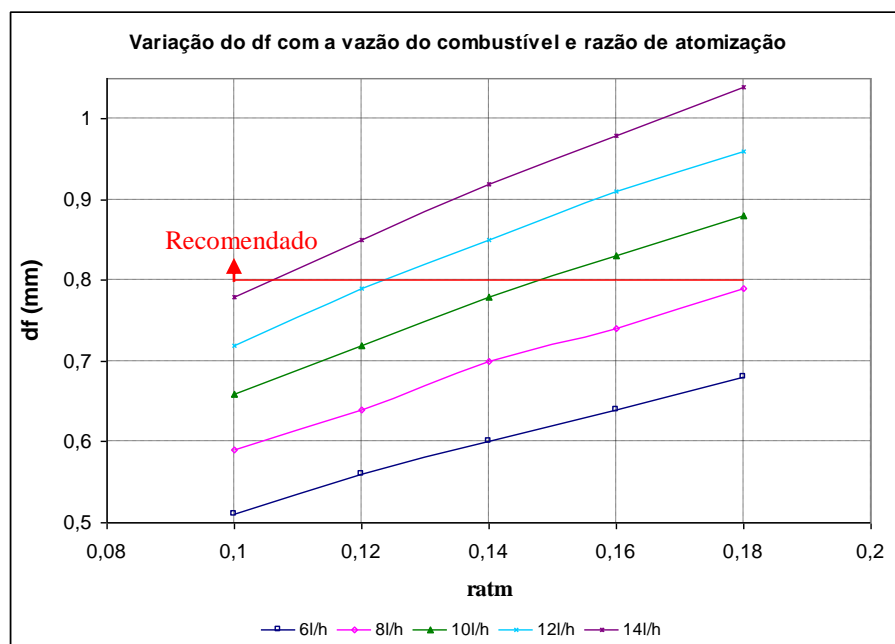


Figura 51 - Gráfico df x $ratm$ para algumas vazões de combustível.

De acordo com as observações feitas, chegamos a conclusão de que com uma vazão de combustível de 10L/h a uma razão de atomização de 0,15 e a uma temperatura de entrada de ar e combustível de 27°C e 75°C, respectivamente, tornaria o dimensionamento do atomizador factível com um d_f de 0,8 mm e MMD de 95,74 μm , segundo a Tabela 30 e Figura 52.

Com essa vazão de combustível gerará uma demanda mensal de 6000L de óleo.

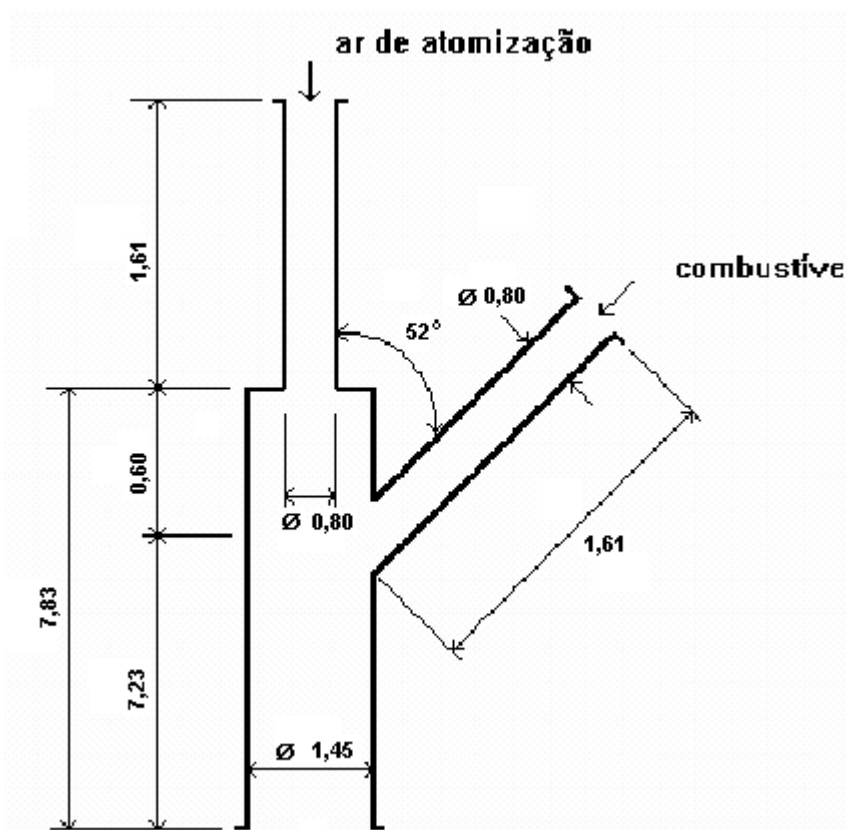


Figura 52 - Atomizador Dimensionado em milímetros.

5 CONCLUSÃO

Com os resultados de PCI obtidos é possível ter o reaproveitamento do óleo na queima, com isso chegou-se um dimensionamento do queimador com MMD abaixo de 100mm. Porém para confirmação do seu uso, será necessário testá-lo.

Frente ao consumo de madeira (36ton./mês) e a dificuldade de obtenção, percebe-se que com o uso do óleo haverá uma redução de custos atrelados ao processo, pois o mesmo é proveniente da empresa pertencente ao usuário do queimador.

A partir da análise do óleo, determinou-se as dimensões do queimador com boa precisão, devido à pequena incerteza gerada no ensaio de viscosidade com o Rheo-Viscosímetro e as suposições feitas baseadas em experiências práticas [5].

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] PETROBRÁS DISTRIBUIDORA S.A.

Ficha de Informação de Segurança de Produto Químico – FISPQ.

[2] DECRETO de LEI nº 153/2003 de 11-07-2003 [on line].

Disponível: "http://www.diramb.gov.pt/data/basedoc/txt_ln_25548_1_0001.htm"

[capturado em 11 jan. 2005].

[3] O QUEIMADOR [on line].

Disponível: "<http://fogueiro.no.sapo.pt/queimador/queimador.htm>."

[capturado em 14 jan. 2005].

[4] QUEIMADORES [on line].

Disponível: "http://alfa.ist.utl.pt/~lroriz/mypage/et_t34.htm"

[capturado em 14 jan. 2005].

[5] ATOMIZADORES DE LÍQUIDO.

Anotações pessoais do Phd João Andrade Carvalho Jr - IMPE.

[6] <http://www.laboroil.com.br>.

[capturado em 20 de jan. de 2005]

[7] CPM - PROGRAMA DE CERTIFICAÇÃO DE PESSOAL DE MANUTENÇÃO/ MECÂNICA / LUBRIFICAÇÃO – SENAI [on line].

Disponível: http://www.wc_andrade.ubbi.com.br.

[capturado em 12 fev. 2005].

[8] CURSO BÁSICO DE MECÂNICA DOS FLUIDOS.

Disponível: <http://www.escoladavida.eng.br>.

[capturado em 23 fev. 2005].

[9] INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO – DEPARTAMENTO DE FÍSICA – VISCOSIDADE CINEMÁTICA [on line].

Disponível: "<http://www.defi.isep.ipp.pt/normas/1015.pdf>"

[capturado em 23 fev. 2005].

[10] UNICAMP – DEPARTAMENTO DE ENERGIA – DETERMINAÇÃO DA VISCOSIDADE [on line].

Disponível: "<http://www.fem.unicamp.br/~em712/viscos.doc>"

[capturado em 23 fev. 2005].

[11] UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO – Laboratório de Termofluidos. Rheo-Viscosímetro KD 2.1 – Manual de Instruções – 2000.

[12] FUNDAMENTOS DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR E DE MASSA - Frank P. Incropera & Favid P. Dewitt , 3° ed., 1992.

Tabela A.5: Propriedades Termofísicas de Fluidos Saturados, página 436.

[13] UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO – Laboratório de Geração de Potência (LAGEPOT). Manual de Operação do Calorímetro.

[14] FUNDAMENTOS DA TERMODINÂMICA - Richard E. Sonntag, Claus Borgnakke, Gordon J. Van Wylen, 5° ed., 1998.

Tabela 14.3: Entalpia de Combustão, em KJ/Kg, para alguns Hidrocarbonetos à 25 °C, pág 401.

[15] LUBRIFICANTES E LUBRIFICAÇÃO INDUSTRIAL – Antônio Geraldo Baeta da Cruz ABM (Associação Brasileira de Metais) – São Paulo, 1989.

[16] Baseado na experiência do Prof. Sérgio Leite Lopes, M.Sc.

[17] MECÂNICA DOS FLUIDOS – Victor L. Streeter, E. Benjamin Wylie, 7° Ed., 1982.

Tabela 1.3: Valores aproximados das propriedades de líquidos a 20°C pressão atmosférica normal, pág. 19.