

Paper CIT02-0763

CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA E FÍSICO-QUÍMICA DE MISTURAS DE COMBUSTÍVEIS E ANÁLISE DE DESEMPENHO EM MOTORES

Ithamar Ribeiro Rangel

Instituto Militar de Engenharia – IME
Departamento de Engenharia Mecânica e Materiais – DE/4
Praça Gen. Tibúrcio, 80, Praia Vermelha – Urca – cep: 22290-160
Rio de Janeiro, RJ, Brasil
ita@epq.ime.eb.br / ithamar@microlink.com.br

Roberto Guimarães Pereira

Universidade Federal Fluminense – UFF
Departamento de Engenharia Mecânica
Rua Passos da Pátria, 156, São Domingos – cep: 24210-240
Niterói, RJ, Brasil
temrobe@vm.uff.br

Resumo. A baixa solubilidade do etanol anidro em óleo diesel, motivou o estudo de misturas ternárias onde o butanol normal é utilizado como co-solvente. Dentro deste enfoque várias misturas foram ensaiadas no motor MBB OM355/6A, obtendo-se em alguns casos, desempenho igual ou superior ao do óleo diesel. Os resultados obtidos nos testes de desempenho em banco dinâmométrico, o levantamento dos parâmetros reológicos e as propriedades físico-químicas de misturas são apresentados.

Palavras chave: *Combustíveis, Reologia e propriedades de fluidos, Motores de Combustão Interna.*

1. Introdução

A matriz energética mundial mostra uma movimentação acelerada de substituir parte dos combustíveis fósseis por combustíveis derivados das biomassas. Tanto na Europa e nos Estados Unidos como na América Latina e Ásia, mostram tendências de intensificação de pesquisas e rápido aumento de produção e uso de biocombustíveis, gerados à base de diversas matérias primas agrícolas, como milho, beterraba, trigo, soja e girassol, além da cana.

A demanda de óleo diesel, mais do que qualquer outro derivado, vem determinando a muito uma evasão de divisas através das importações do óleo cru e do próprio óleo diesel, além disso, ressalta-se que os grandes produtores e as grandes quantidades das Reservas Mundiais encontram-se no Oriente Médio, região dotada de alta instabilidade política. Dentro deste panorama o óleo diesel torna-se um combustível crítico, pois qualquer impedimento à importações traria um reflexo imediato ao sistema de transporte do país, já que este sistema é baseado principalmente no transporte rodoviário. Esses aspectos associados que novas reservas mundiais de petróleo estão cada vez mais escassas, torna-se imperativo que pesquisas sejam realizadas com o objetivo de encontrar alternativas que venham minimizar ou até atingir um grau de completa independência, não só do óleo diesel, mas como de todos derivados do petróleo.

No entanto, se as poucas modificações nos tradicionais motores de ignição por centelha (motor a gasolina) viabilizaram a utilização do etanol. Primeiro como mistura e depois como substituto completo da gasolina, o mesmo não ocorre para com o óleo diesel.

Dentre as várias alternativas para substituição parcial do óleo diesel, a utilização de misturas diesel-etanol anidro destaca-se como a de aplicação mais simples , já que existe grande disponibilidade de etanol e não é necessário qualquer alteração no motor original.

O principal problema deste tipo de alternativa é a baixa solubilidade do etanol em óleo diesel, e estabilidade que essas misturas possuem com a variação de temperatura e umidade ambiente, impedindo a utilização de misturas com teores acima de aproximadamente 5% de etanol. Uma das soluções para aumentar a solubilidade e melhorar a estabilidade é utilizar uma terceira substância que, agindo como co-solvente, possibilite teores de misturas com o melhor nível de estabilidade e maiores percentuais de substituições. Dentre as várias alternativas de utilização de co-solventes, optou-se inicialmente pelo butanol, uma vez que esta substancia pode ser produzida a partir da cana.

A principal vantagem em utilizar o butanol como co-solvente, seria que esta alternativa permitiria alargar as possibilidades da cana de açúcar, pois a partir dela três produtos principais seriam obtidos: etanol, butanol e açúcar.

O objetivo do trabalho é apresentar resultados comparativos, obtidos através de ensaios de desempenho em banco dinâmométrico, do motor MBB OM355/6A utilizando óleo diesel e misturas ternárias, e investigar as variações dos parâmetros reológicos e físico-químicos dessas misturas em relação ao óleo diesel.

2. Teste de desempenho do motor MBB OM355/6A

Foram realizados teste de desempenho em banco dinamométrico com as seguintes misturas:

Tabela 1. Misturas selecionadas para serem utilizadas nos testes de desempenho

MD+10(3,0+7,0)BE	MD+11,5(3,5+8,0)BE	MD+12,5(5,0+7,5)BE
MD+12,5(4,5+8,0)BE	MD+(5,0+10)BE	-

MD+A(B+C)BE – misturas com A% de substituição de óleo diesel , sendo A% igual a B% de Butanol normal mais C% de etanol anidro.

2.1 Características do motor

• Marca:	Mercedes-Benz
• Modelo:	OM355/6A
• Número de série:	E-253-MBB
• Número de cilindros:	06
• Curso:	150mm
• Diâmetro do cilindro:	129,52mm (reparo III)
• Cilindrada total:	11857 cm ³
• Taxa de compressão:	15:1
• Aplicação:	Veicular
• Câmara de combustão:	Injeção direta
• Regulador de velocidade:	RQ-250/1100 PA419R
• Bomba injetora:	Bosch, 44 80 300

2.2 Instrumentação utilizada

- Dinamômetro de indução marca Schenck, modelo D630, com capacidade de absorção de até 630 Kw à 5500 rpm.
- Medidores de pressão:
 - Manômetro analógico, marca Okan, campo de medição de zero a 20 Kgf/cm², precisão de 0,25 Kgf/cm².
 - Manômetro analógico, marca Suko, campo de medição de zero a 60 Kgf/cm², precisão de 1 Kgf/cm².
- Medidores de temperatura:
 - Termômetro analógico, marca Henni, campo de medição de zero a 160 °C, precisão de 1 °C.
- Medição do consumo de combustível:
 - Bureta de vidro, calibrada para 100, 300 e 400 cm³.
 - Cronômetro digital automático, marca ALFA, precisão 0,1 segundos.
- Medição das condições atmosféricas:
 - Termômetro analógico, marca Hurger, campo de medição de zero a 55 °C, precisão de 1°C.
 - Manômetro analógico, marca Hurger, precisão 1mm de Hg.
 - Psicômetro analógico, marca Hurger, precisão de 1%.

2.3 Metodologia aplicada na execução dos ensaios

- Os ensaios foram realizados segundo a orientação da norma ABNT 5484.
- O início de cada bateria de ensaios sempre foi precedido da estabilização da temperatura do óleo lubrificante e da temperatura da água de arrefecimento.
- Para a avaliação dos resultados tomou-se como padrão de referência o desempenho do motor com o seu combustível original, óleo diesel, para a solicitação de plena carga.

2.4 Resultados obtidos

Os percentuais de substituição de óleo diesel, efetuados através da adição de butanol normal e etanol anidro, foram corrigidos e avaliados de acordo com as seguintes expressões:

$$SC = 1 - (CEVDM / CEVD) \times 100 \quad (1)$$

SC – percentual de substituição corrigido de óleo diesel

CEVDM – consumo específico volumétrico de óleo diesel na mistura

CEVD – consumo específico volumétrico de óleo diesel

$$CEVDM = (DM \times CV) / Neo \quad (2)$$

DM – percentual de diesel na mistura

CV – consumo volumétrico da mistura álcool-diesel

Neo – potência efetiva observada

$$ES = (SC / SV) \times 100 \quad (3)$$

ES – eficiência de substituição de óleo diesel

SC – percentual de substituição corrigido de óleo diesel

SV – substituição volumétrica de óleo diesel

Todas as misturas aplicadas ao motor MBB OM355/6A, resultaram em queda média máxima de potência inferior a 5% e um aumento médio máximo no consumo específico de 6%, conforme a Tab. (2).

A variação de potência efetiva observada e o consumo específico entre o motor alimentado com o óleo diesel e com as diversas misturas, pode ser observada através da Fig. (1) e Fig. (3).

As misturas MD+(3,0+7,0)BE, MD+11,5(3,5+8,0)BE, MD+12,5(4,5+8,0)BE, MD+12,5(5,0+7,5)BE e MD+15(5,0+10)BE obtiveram variações percentuais médias de potência efetiva observada e momento de força observado de 0,5; -2,4; -2,7; -3,9; -4,1 e -3,6; -1,6; -2,7; -2,3; -0,4 para o consumo específico, conforme a Tab. (2) e Fig. (2) e Fig. (4).

Tabela 2. Resultados médios obtidos nos testes de desempenho em banco dinamométrico do motor MBB OM355/6A

MISTURAS	MD + 10(3,0+7,0)	MD + 11,5(3,5+8,0)BE	MD + 12,5(4,5+8,0)BE	MD + 12,5(5,0+7,5)BE	MD + 15(5+10)BE	ÓLEO DIESEL
RENDIMENTO TÉRMICO	41,9	41,0	41,7	41,4	40,9	39,1
SUBSTITUIÇÃO VOLUMÉTRICA DE ÓLEO DIESEL (%)	10	11,5	12,5	12,5	15	-
SUBSTITUIÇÃO VOLUMÉTRICA CORRIGIDA DE ÓLEO DIESEL (%)	12	11,9	14,0	14,0	14,8	-
EFICIÊNCIA DE SUBSTITUIÇÃO (%)	120	103,5	112	112	98,7	-
VARIAÇÃO DE POTÊNCIA E MOMENTO DE FORÇA OBSERVADO (%)	0,5	-2,4	-2,7	-3,9	-4,1	-
VARIAÇÃO DO CONSUMO ESPECÍFICO (%)	-3,6	-1,6	-2,7	-2,3	-0,4	-
VARIAÇÃO DO RENDIMENTO TÉRMICO (%)	7,2	4,9	6,6	5,9	4,6	-

Para a substituição volumétrica do óleo diesel, os valores encontrados de 12; 11,9; 14; 14 e 14,8; com eficiência de substituição de 120; 103,5; 112; 112 e 98,7 respectivamente, conforme a Fig. (5) e Fig. (6).

Em termos de rendimento térmico, os resultados encontrados são superiores aos mostrados com o óleo diesel, conforme Tab. (2) e Fig. (7), obtendo-se variações percentuais médias de 7,2; 4,9; 6,6; 5,9 e 4,6 respectivamente, conforme a Tab. (2) e Fig. (8).

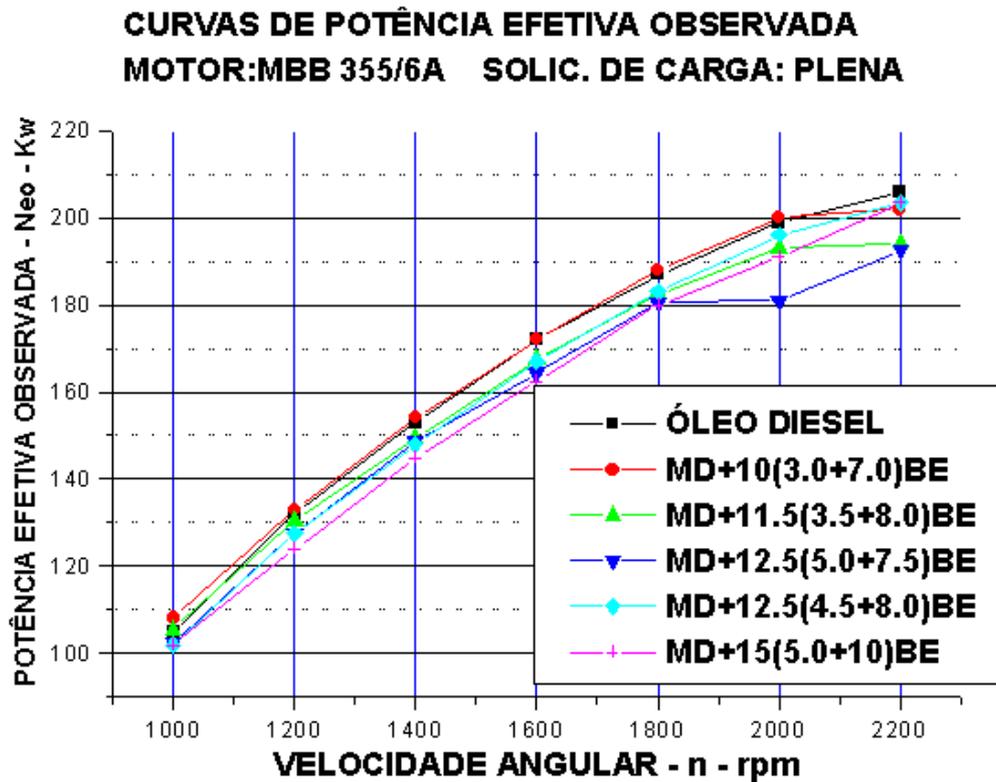


Figura 1. Curvas de potência efetiva observada

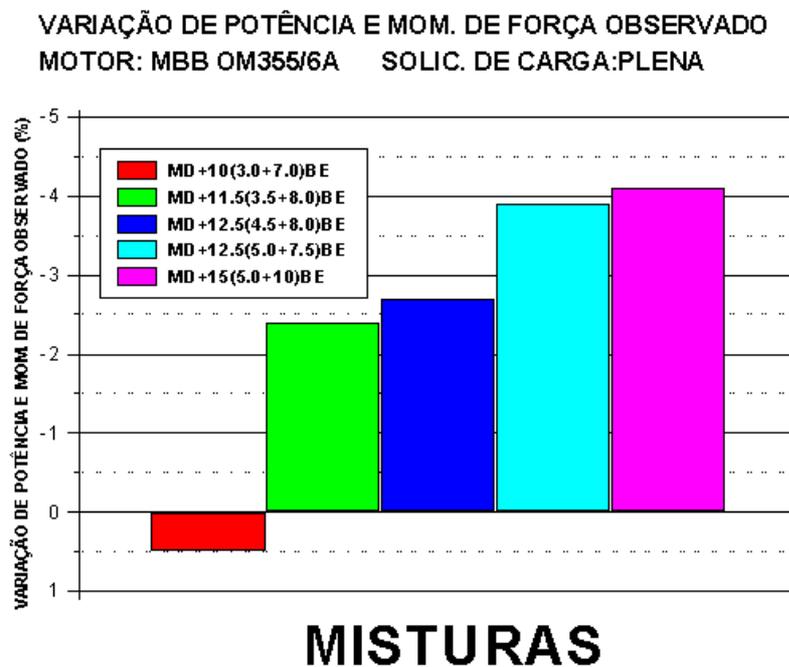


Figura 2. Variação percentual média de potência e momento de força observado

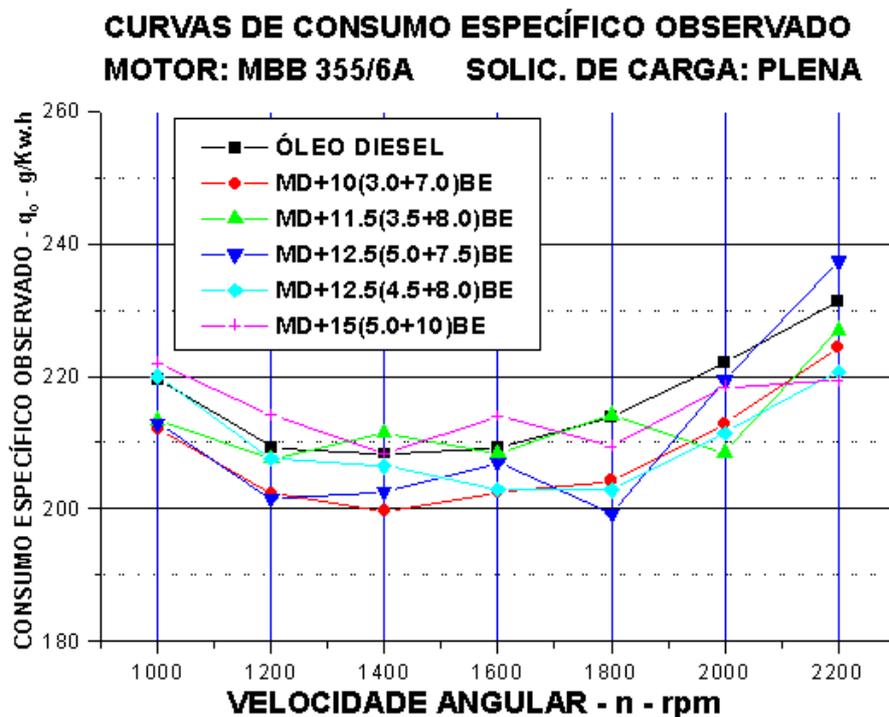


Figura 3. Curvas de consumo específico observado

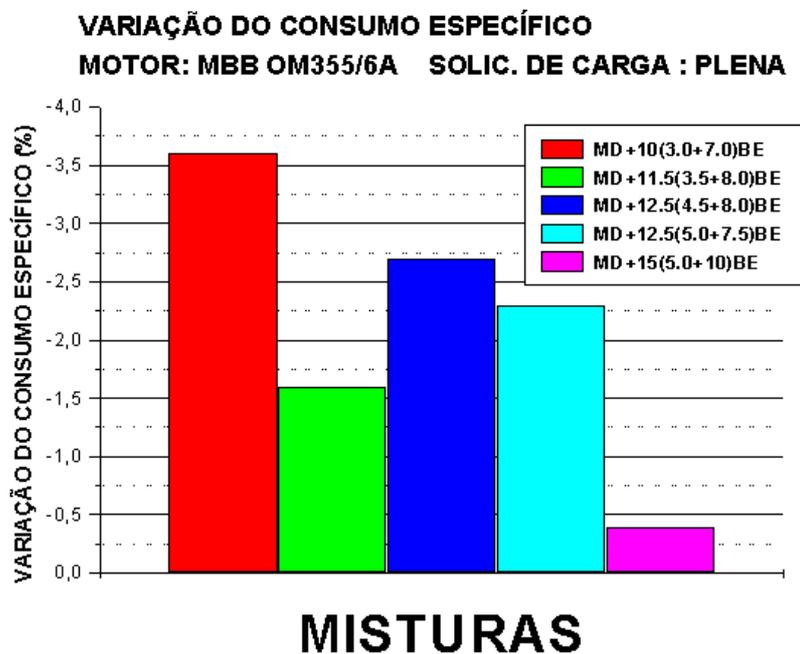


Figura 4. Variação percentual média do consumo específico

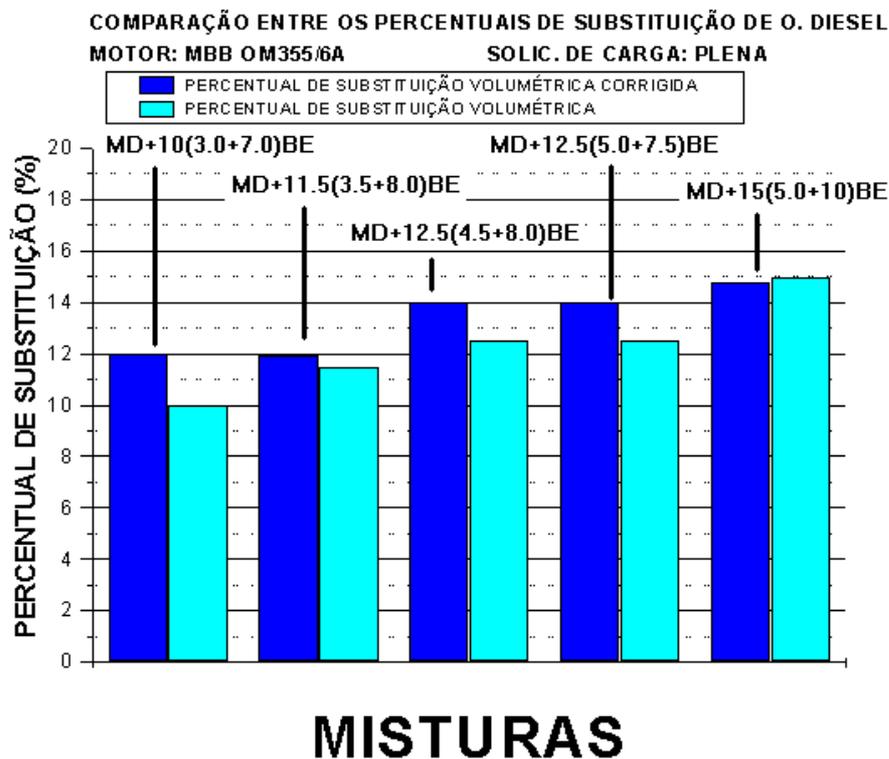


Figura 5. Comparação dos percentuais de substituição volumétrica do óleo diesel

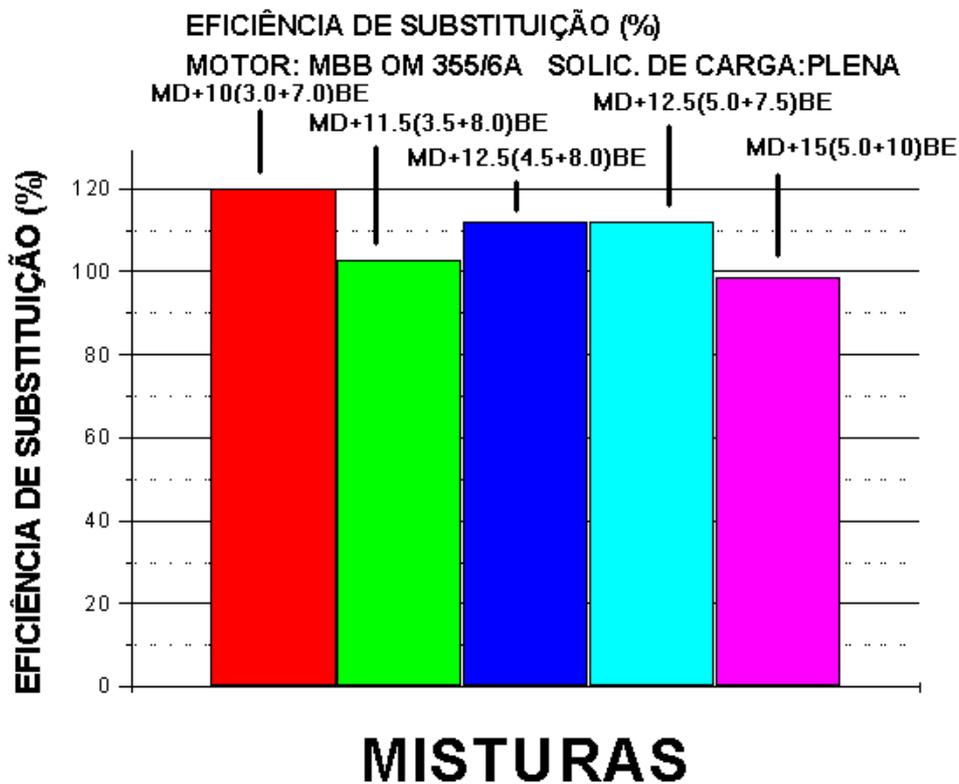


Figura 6. Eficiência de substituição

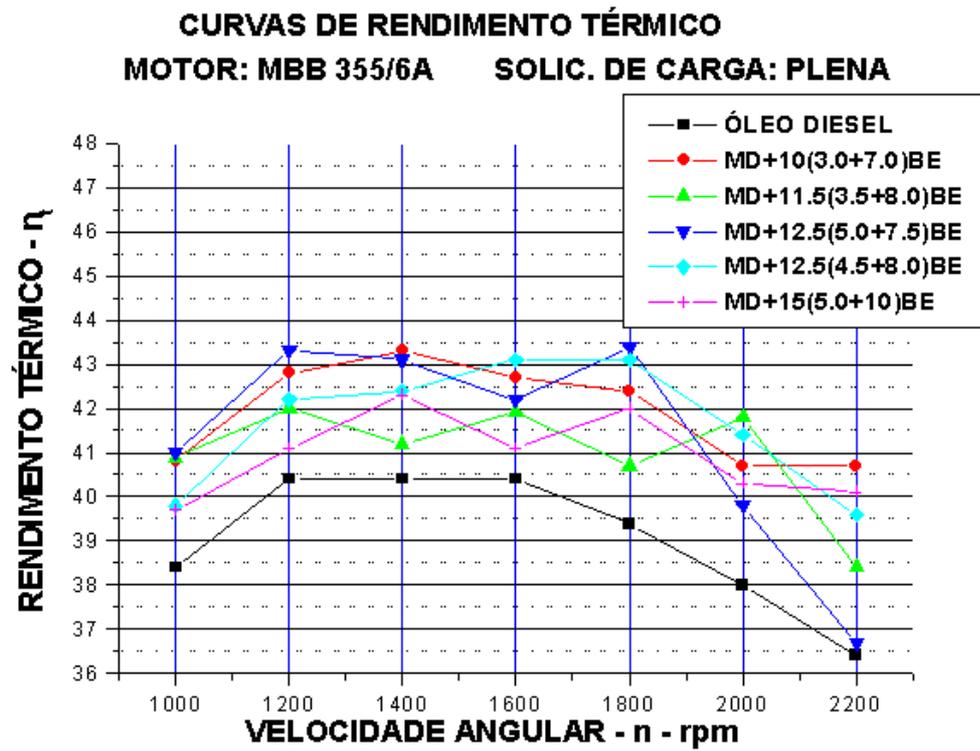


Figura 7. Curvas de rendimento térmico

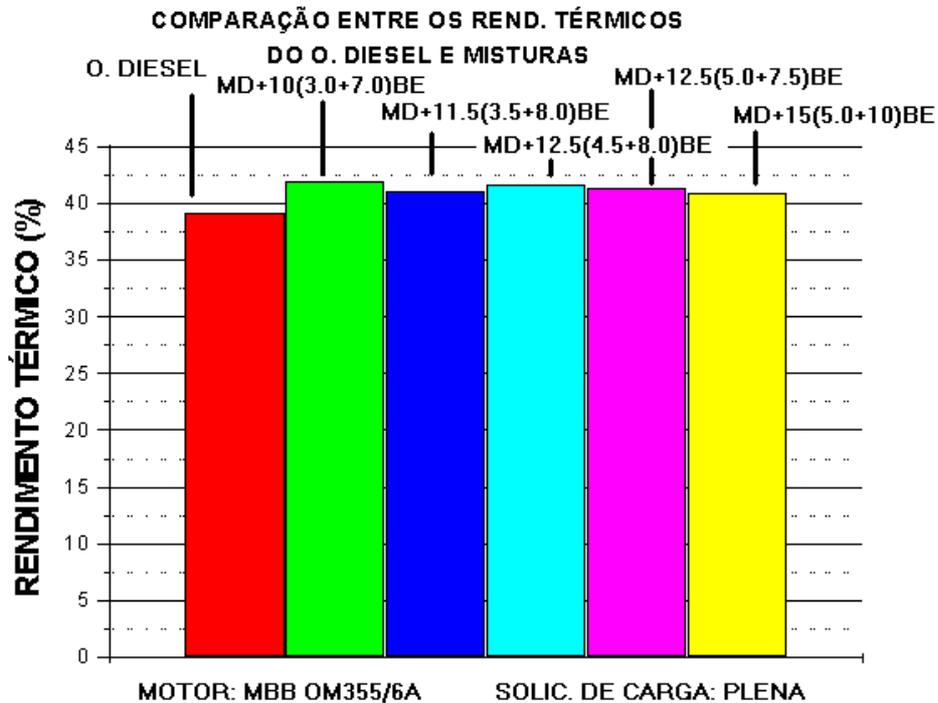


Figura 8. Comparação entre os rendimentos térmicos do óleo diesel e misturas

3. Caracterização reológica

O objetivo da caracterização reológica é o levantamento das possíveis variações dos parâmetros reológicos das misturas álcool-diesel em relação ao óleo diesel. Para isto submeteu-se as amostras ao teste de cisalhamento (*steady shear*), obtendo-se as curvas de viscosidade aparente em função da taxa de deformação.

3.1 Instrumentação utilizada

Todas as medidas foram realizadas em um reômetro rotativo RS50 conectado a um banho termostático K20-DC5, ambos de marca HAAKE, utilizando-se o sensor de geometria tipo cilindros concêntricos DG41, cuja especificações geométricas encontram-se listadas na Tab. (3)

Tabela 3. Especificações do sensor de cilindros concêntricos

Diâmetro interno 1	35,500 mm
Diâmetro interno 2	36,000mm
Diâmetro Externo 1	42,800mm
Diâmetro Externo 2	43,400mm
Volume da amostra	6,3 cm ³

3.2 Metodologia aplicada na execução dos testes

- Os produtos utilizados na obtenção das misturas álcool-diesel são de origem comercial, sendo as mesmas preparadas no Laboratório de Reologia da UFF.
- Para cada medição sempre utilizou-se uma nova amostra, e antes de iniciar o teste aguardava-se que ela entrasse em equilíbrio térmico.
- As amostras foram medidas e introduzidas no sensor através de seringas com campo de medição de 0 a 6mm e precisão de 0,1 mm.
- Foram realizados, para cada mistura, testes nas temperaturas de 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 e 90 °C respectivamente.

3.3 Teste de cisalhamento

O teste de cisalhamento consiste em impor à amostra de fluido um determinado valor de tensão (método a tensão controlada – CS) ou de deformação (método de deformação controlada – CR) obtendo-se como resposta, respectivamente, um valor de deformação ou de tensão. Obtém-se, então, a curva de escoamento do material, relacionando a tensão com a taxa de deformação. Uma relação linear caracteriza o fluido como Newtoniano, sendo a viscosidade do fluido independente da taxa de deformação. Para o caso de uma relação não linear entre a tensão e a taxa de deformação, tem-se um fluido não-Newtoniano cujo o valor da viscosidade depende da taxa de deformação aplicada. Para os fluidos até então investigados a viscosidade não variou com a taxa de deformação, conforme Fig. (9).

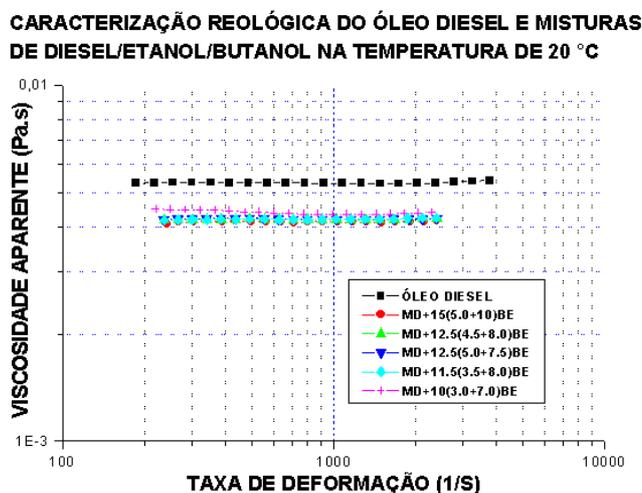


Figura 9. Caracterização reológica do óleo diesel e misturas

3.4 Resultados obtidos

A Figura (10) apresenta a variação da viscosidade aparente com a temperatura do óleo diesel e misturas álcool-diesel obtidas nos testes de cisalhamento.

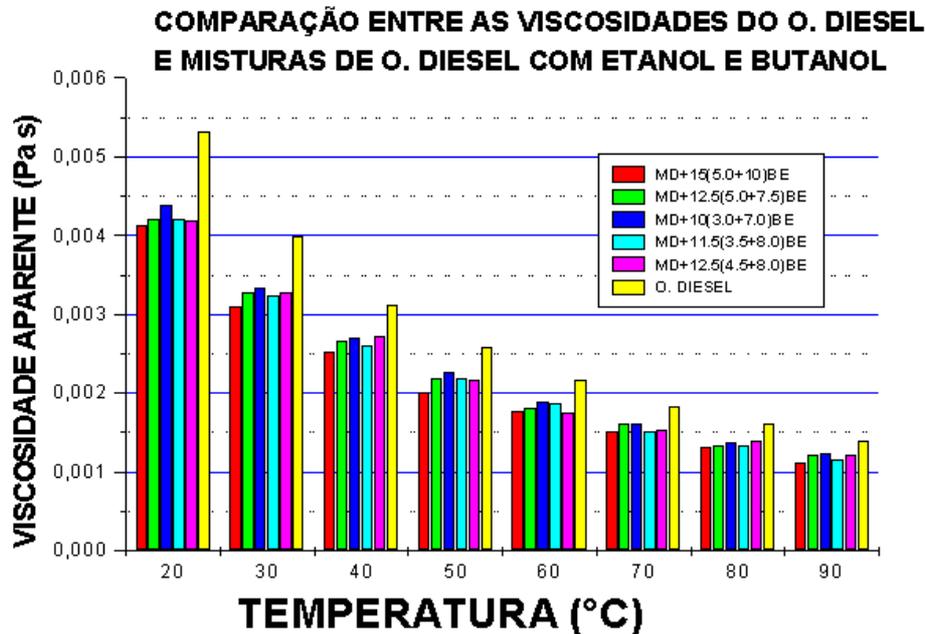


Figura 10. Comparação entre as viscosidades do óleo diesel e misturas álcool-diesel

Constata-se através da mesma a diferença entre os valores de viscosidade aparente do óleo diesel e misturas álcool-diesel, sendo que esta acentua-se na temperatura de 20 °C e decresce na medida que a temperatura aumenta.

Na Figura (11) encontram-se as diferenças percentuais dos resultados obtidos nos testes de cisalhamento, entre as viscosidades aparentes do óleo diesel e misturas álcool-diesel. Evidencia-se essa diferença entre a mistura MD+15(5,0+10)BE e o óleo diesel, obtendo-se valores que variam entre 17,5 a 22,5% no intervalo de temperatura entre 20 a 90°C. Para as demais misturas os valores posicionaram-se entre 12 a 21%, destacando-se a mistura MD+10(3,0+10)BE, para a qual obtiveram-se as menores variações percentuais, e estas posicionaram-se entre 12 a 17,5%.

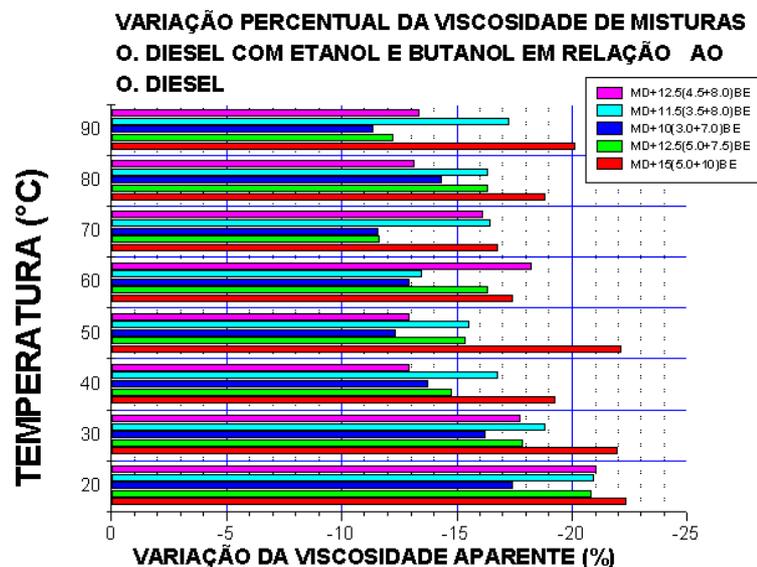


Figura 11. Variação percentual da viscosidade aparente das misturas álcool-diesel em relação ao óleo diesel

4. Caracterização físico-química

O óleo diesel é uma complexa mistura de vários hidrocarbonetos, obtidos através da destilação do petróleo no intervalo de temperatura de temperatura entre 150 a 380 °C. A sua composição está diretamente relacionada a constituição do óleo que o deu origem e as necessidades impostas pelo mercado consumidor. A sua constituição determina as características necessárias para a sua utilização em motores de ignição por compressão, necessitando portanto que essas sejam determinadas em laboratórios e acompanhadas no campo, possibilitando assim que sua utilização não comprometa a durabilidade e desempenho da máquina térmica.

Quando mistura-se etanol anidro ao óleo diesel, esta adicionando-se ao mesmo um combustível de características acentuadamente diferentes as do óleo, isto é, um combustível de menor densidade, menor poder calorífico, menor número de cetano, menor viscosidade, entre outras, limitando-se portanto o percentual de substituição do óleo diesel pelo etanol.

Diante do exposto acima, optou-se pelo levantamento das propriedades da mistura álcool-diesel MD+15(5,0+10)BE, por ter o maior percentual de substituição de óleo diesel (10% de etanol e 5% de butanol), sendo então, dentre as utilizadas na investigação a que impõe maior severidade ao motor.

4.1 Resultados obtidos

A tabela (4) apresenta os resultados encontrados através da análise físico-químicas do óleo diesel e da mistura MD+15(5,0+10)BE, dentre as características apresentadas destacam-se as que afetam o desempenho e durabilidade do motor, citando-se a viscosidade cinemática, o índice de cetano, densidade, poder calorífico superior e teor de enxofre; obtendo-se as diferenças percentuais entre a mistura e o óleo diesel de -16,8; -13,1; -3,0; -4,8 e -15,4 respectivamente

Para as propriedades cor ASTM, ponto de névoa, destilação 85% evaporado, resíduo de carbono e água e sedimentos; as diferenças percentuais encontradas foram de -20; 16,6; -1,6; -15,4 e 0,0 respectivamente.

Tabela 4. Propriedades físico-químicas do óleo diesel e mistura MD+15(5,0+10)BE

Propriedades	Óleo diesel	Mistura	Varição (%)
Cor ASTM	2,5	2,0	-20
Viscosidade cSt à 37,8 °C	3,58	2,98	-16,8
Ponto de névoa, °C	6	7	16,6
Destilação 85% evaporado, °C	356	350	-1,6
Resíduo de carbono 10% do fundo de destilação, % em peso	0,13	0,11	-15,4
Enxofre, % em peso	0,80	0,68	-15
Água e sedimentos, % em volume	0,1	0,1	0
Índice de cetano calculado	53,5	46,5	-13,1
Densidade à 20 °C	0,8486	0,8230	-3,0
Poder calorífico superior, cal/g	10828	10311	-4,8

5. Análise dos resultados

De um modo geral, os resultados de desempenho obtidos em banco dinamométrico, na solicitação de carga plena, utilizando o motor MBB OM355/6A, podem ser considerados excelentes. Apesar das misturas apresentarem uma queda de potência, exceto a mistura MD+10(3,0+7,0)BE, conforme a Tab. (2) e Figs. (1) e (2), todas apresentaram redução no consumo específico e aumento no rendimento térmico, conforme a Tab. (2) e Figs. (3), (4), (7) e (8), resultando em percentuais de substituição corrigidos semelhantes ou maior que os percentuais volumétricos, obtendo-se assim, eficiência de substituição bastante elevada, conforme a Tab. (2) e Figs. (5) e (6). Esses resultados podem ser traduzidos, em uma primeira análise, que a perda de potência encontra-se diretamente relacionada a subtração do valor energético agregado e a diminuição da densidade das misturas.

Através da caracterização reológica, o óleo diesel e misturas álcool-diesel apresentaram-se como fluidos newtonianos em relação a viscosidade aparente, isto é, a viscosidade aparente não variou com a taxa de deformação, conforme Fig. (9), porém constatou-se um decréscimo dos valores obtidos com as misturas em relação ao óleo diesel, conforme Figs. (10) e (11). Estes resultados são preocupantes, pois o fluido combustível em um motor de ignição por compressão é também responsável pela lubrificação dos elementos de bomba e bicos injetores. Esta queda de viscosidade aparente das misturas pode ocasionar subtração do poder de lubrificação e acarretar a deterioração precoce do sistema de injeção, resultando em queda de desempenho e durabilidade do motor.

Os valores obtidos na determinação das propriedades físico-químicas da mistura MD+15(5,0+10)BE, utilizada como referência, apresentaram um decréscimo significativo no resíduo de carbono e teor de enxofre. Esses resultados norteiam para uma subtração nos depósitos de carbono na câmara de combustão e melhora nas emissões de particulados e nos componentes dos gases de escape. Em contrapartida o decréscimo da viscosidade cinemática, densidade e índice

de cetano influenciam diretamente a combustão, mudando as características do jato de combustível e proporcionando um maior atraso da inflamação.

6. Conclusões

Os ensaios de desempenho em banco dinamométrico efetuados com o motor MBB OM355/6A, na solicitação de plena carga, utilizando as misturas álcool-diesel, sua caracterização reológica e físico-química, mostraram uma possível viabilidade de aplicação em maior escala, principalmente para a mistura MD+10(3,0+7,0)BE, porém para isto é necessário que sejam realizados testes de desempenho utilizando outros tipos de motores, estudos de fenômenos inerentes a combustão, teste de durabilidade em banco dinamométrico e a aplicação em frotas, determinando o seu comportamento em campo.

7. Agradecimentos

Os autores do trabalho agradecem ao CNPq e a FAPERJ pelo apoio financeiro prestado.

8. Referências

- Mascosko, C. W., 1994, "Rheology: principles, measurements and applications". Ed. VCH Plubishers, Inc., United States of America, pp. 190-191.
- Owen, k., Coley, T., 1990, "Automotive Fuels Handbook", Ed. Society of Automotive Engineers, Inc., United States of America, pp. 417, 319-343.

9. Direitos autorais

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso neste trabalho.

RHEOLOGICAL AND PHYSICAL-CHEMICAL CHARACTERIZATION OF FUELS BLENDS AND PERFORMANCE ANALYSIS IN ENGINES.

Ithamar Ribeiro Rangel

Instituto Militar de Engenharia – IME
Departamento de Engenharia Mecânica e Materiais – DE/4
Praça Gen. Tibúrcio, 80, Praia Vermelha – Urca – cep: 22290-160
Rio de Janeiro, RJ, Brasil
ita@epq.ime.eb.br / ithamar@microlink.com.br

Roberto Guimarães Pereira

Universidade Federal Fluminense – UFF
Departamento de Engenharia Mecânica
Rua Passos da Pátria, 156, São Domingos – cep: 24210-240
Niterói, RJ, Brasil
temrobe@vm.uff.br

Abstract. The low solubility of ethanol in the diesel oil has motivated the study of blends using butanol like co-solvent. In this work, rheological parameters and physical and chemical properties were investigated. The blends were tested in engines as: MBB OM355/6A. The results obtained in dynamometer bench, the rheological and physical and-chemical properties are shown.

Keywords. *Fuels, Rheology and Fluid Properties, Internal Combustion Engines.*