



HOLOS

ISSN: 1518-1634

holos@ifrn.edu.br

Instituto Federal de Educação, Ciência e

Tecnologia do Rio Grande do Norte

Brasil

de Farias, A. C. M.; de Santana, J. S.; Oliveira Filho, M. F.; de Santana, J. S.; Barbosa, C. R. F.; de Medeiros, J. T. N.

OS COMBUSTÍVEIS VERDES DO BRASIL - AVALIAÇÃO DA LUBRICIDADE DO BIODIESEL B5 E ÓLEOS DE MAMONA E COCO

HOLOS, vol. 3, 2011, pp. 3-17

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte  
Natal, Brasil

Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=481549216001>

- ▶ Como citar este artigo
- ▶ Número completo
- ▶ Mais artigos
- ▶ Home da revista no Redalyc

redalyc.org

Sistema de Informação Científica

Rede de Revistas Científicas da América Latina, Caribe, Espanha e Portugal  
Projeto acadêmico sem fins lucrativos desenvolvido no âmbito da iniciativa Acesso Aberto

## OS COMBUSTÍVEIS VERDES DO BRASIL - AVALIAÇÃO DA LUBRICIDADE DO BIODIESEL B5 E ÓLEOS DE MAMONA E COCO

**A. C. M. de Farias<sup>1</sup>, J. S. de Santana<sup>1</sup>, M. F. Oliveira Filho<sup>2</sup>, J. S. de Santana<sup>1</sup>, C. R. F. Barbosa<sup>1</sup>, J. T. N. de Medeiros<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Norte e <sup>2</sup>Instituto Federal do Rio Grande Norte Universidade – Campus Natal Central  
 alinecmfarias@ufrnet.br, jaciana\_santana@yahoo.com.br, jana\_materiais@yahoo.com.br, cleiton@ufrnet.br,  
 jtelesforo@yahoo.com

Artigo submetido em dezembro/2010 e aceito em junho/2011

### RESUMO

O biodiesel é uma opção brasileira ambiental e economicamente geradora de tecnologia, de divisas e de renda. Do ponto de vista tribológico, a lubricidade do Biodiesel e o tempo de vida da linha de alimentação do combustível se correlacionam. Cinco grandes fabricantes europeus de equipamentos de injeção de combustível Diesel e Biodiesel emitiram nota em 2009, chamando à atenção em relação ao uso da norma ASTM D 975-09, que tolera dimensão da escara  $d_e < 520 \mu\text{m}$  (pela norma EN 590,  $d_e < 460 \mu\text{m}$ ) e; também ao tempo de vida em serviço destes

equipamentos – afetado quando do uso de óleo biodiesel de plantas não-esterificadas. Este trabalho tem como objetivo determinar e avaliar a lubricidade de quatro óleos (B5, óleo diesel convencional, óleo de mamona e óleo de coco) pela sonda de deslizamento alternado de alta freqüência, o HFRR. Os resultados mostraram desempenho superior para o B5, o qual obteve  $d_e$  40 % menor que o diesel convencional e  $d_e$  30 % e  $d_e$  15 % maiores quando comparado aos óleos vegetais de mamona e coco, respectivamente.

**PALAVRAS-CHAVE:** Petróleo, riscos ambientais, perfuração, sonda, mapa de riscos.

### GREEN FUELS OF BRAZIL - EVALUATION OF LUBRICITY OF B5 BIODIESEL AND RICIN AND COCONUT OILS

### ABSTRACT

Biodiesel is a Brazilian option environmentally and economically generating technology, foreign exchange and income. From the tribological point of view, lubricity of Biodiesel and the lifetime of the fuel are correlated. Five major European manufacturers of equipments of the injection Diesel and Biodiesel issue public statement in 2009, where they warn to application of the ASTM D 975-09, which tolerates wear scar diameter – WSD  $< 520 \mu\text{m}$  (by standard EN 590, WSD  $< 460 \mu\text{m}$ ) and, also for the lifetimes

equipments in service – affected by consumption of non-esterified vegetable oils. This work aims to determine and evaluate the lubricity of the four oils B5, pure fuel diesel, ricin and coconut vegetable oils by High Frequency Reciprocating Test Rig, HFRR. The results showed high performance lubricity for the B5, which obtained 40 % less than conventional diesel and, 30 % and 15 % higher compared to ricin and coconut vegetable oils, respectively.

**KEY-WORDS:** petroleum, environmental risks, drilling rig, the risk maps.

## OS COMBUSTÍVEIS VERDES DO BRASIL - AVALIAÇÃO DA LUBRICIDADE DO BIODIESEL B5 E ÓLEOS DE MAMONA E COCO

### INTRODUÇÃO

Quando Rudolf Diesel inventou o motor diesel há mais de uma centena de anos, ele demonstrou o princípio de ignição por compressão do motor pelo emprego de óleo de amendoim como combustível e sugeriu que os óleos vegetais poderiam ser o combustível do futuro para os motores do ciclo Diesel. Contudo, o petróleo foi descoberto mais tarde e substituiu os óleos vegetais como combustíveis de motores devido ao seu abundante fornecimento (Agarwal *et al.*, 2008).

Os combustíveis fósseis são recursos exauríveis e a busca por recursos renováveis é cada vez mais importante para garantir a segurança energética e a proteção ambiental (Agarwal *et al.*, 2008). O Biodiesel é uma fonte de energia que reduz em média 78% dos emissores poluentes como o dióxido de carbono e 98% de enxofre na atmosfera (Freitas & Fredo, 2005).

Nos últimos anos tem havido uma necessidade crescente do fornecimento de combustíveis ambientalmente corretos, principalmente para utilização em motores de ignição por compressão. Este fato está determinando a redução gradual de compostos de enxofre, aromáticos, polares e de material particulado. A diminuição do teor destes compostos no diesel provoca a redução da poluição do meio ambiente além de sua lubrificidade, aumentando, desta forma, o desgaste de componentes do sistema de injeção de combustível (Bovington *et al.*, 1994; Martins, 2005).

A lubrificidade é uma medida do poder de lubrificação de uma substância, sendo uma função de várias de suas propriedades físicas, destacando-se a viscosidade e a tensão superficial. Diferentemente dos motores movidos à gasolina, os motores do ciclo Diesel exigem que o combustível tenha propriedades de lubrificação, especialmente em razão do funcionamento da bomba, exigindo que o combustível, em escoamento, lubrifique adequadamente suas peças em movimento relativo (Possidonio, 2008).

As especificações da lubrificidade são incluídas nos padrões do diesel mineral nos Estados Unidos (ASTM D975) e na Europa (EN 590). De acordo com CEN EN 590 (2004), o valor máximo de escara de desgaste especificado é de 460 µm (a 60 °C), enquanto que pela norma ASTM D-975 (2010), o máximo valor aceitável é 520 µm (a 60 °C). Entretanto, um estudo recente indicou que os combustíveis que promovem escara de desgaste maior que 460 µm não podem oferecer lubrificidade suficiente para o uso em motores do ciclo Diesel (Lacey e Mason, 1999).

Segundo Agarwal *et al.* (2008), os óleos vegetais apresentam teor de aquecimento, número de cetano, calor de vaporização e razão estequiométrica ar/combustível comparáveis ao óleo diesel mineral. Devido a estas características, segundo Maziero *et al.* (2007), eram comuns, entre 2003 e 2004 em feiras agrícolas, demonstrações de tratores sendo abastecidos com óleo vegetal bruto. Desde então, muitos produtores, por desinformação (confundem biodiesel com óleo vegetal bruto), ou por uma falsa idéia de economia (custo do litro de diesel versus custo do litro de óleo vegetal), passaram a utilizar em suas máquinas agrícolas diferentes tipos de óleos vegetais puros ou misturados ao diesel.

Tais experiências contrariam a maioria das citações encontradas sobre o uso de óleo vegetal *in natura* para alimentar os motores do ciclo Diesel.

Os principais problemas encontrados pelo uso do óleo com combustível, de acordo com Maziero *et al.* (2007), são carbonização dos bicos injetores, travamento de anéis dos pistões, contaminação do óleo lubrificante, entre outros. Os bicos injetores são os primeiros componentes a apresentarem problemas devido à presença da glicerina, causando entupimento, carbonizando o motor, criando depósitos nas sedes de válvulas, provocando problemas nos pistões e podendo chegar a fundir o motor Diesel. Aliado a isto, há liberação de substância tóxica (acroleína) para o meio ambiente. A mistura de diesel e óleo vegetal não é recomendada e/ou autorizada pelos fabricantes de motores do ciclo Diesel, como pela Agência Nacional do Petróleo (ANP), pois esta mistura acarreta a contaminação do óleo do motor e não permite a sua lubrificação. Por outro lado, o uso de biodiesel é uma solução para aumentar a lubricidade de combustíveis diesel de baixo teor de enxofre (Wain *et al.*, 2005).

A principal importância do uso de biodiesel está relacionada à necessidade de redução da maior parte dos gases presentes nas emissões produzidos por motores e responsáveis pelo aquecimento global (Knothe *et al.*, 2006). As misturas de biodiesel promovem a formação de um combustível superior ao diesel por causa do seu baixo teor de enxofre, elevado ponto de fulgor e baixo teor de aromáticos. Motores que utilizam o biodiesel emitem menos poluentes. O biodiesel pode ser usado na sua forma pura ou como aditivo ao combustível diesel para melhorar suas propriedades (Agarwal *et al.*, 2008).

Embora o biodiesel forneça uma quantidade de energia cerca de 10% menor que o diesel de petróleo, seu desempenho no motor é praticamente o mesmo no que diz respeito à potência e ao torque. Por apresentar maior viscosidade, o biodiesel proporciona maior lubricidade que o diesel mineral e tem-se observado redução no desgaste das partes móveis do motor. Por outro lado, o biodiesel possui estruturas moleculares mais simples que o seu precursor, os triglicerídeos; logo, a sua viscosidade é comparativamente menor que a do óleo utilizado na sua obtenção, apresentando maior eficiência de queima e redução significativa da deposição de resíduos nas partes internas do motor (Lôbo *et al.*, 2009).

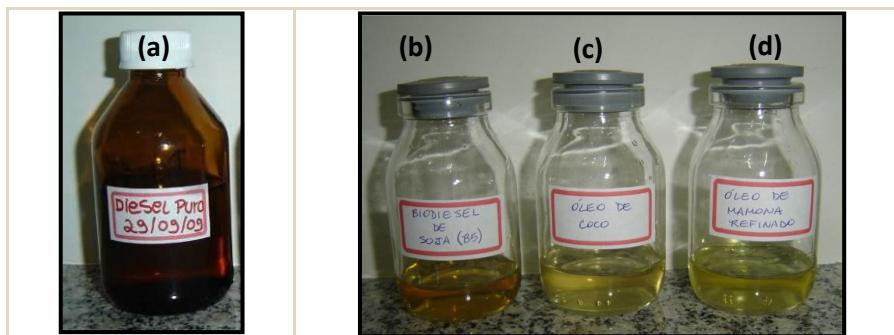
O presente trabalho avalia a lubricidade do diesel convencional (a), uma mistura do diesel convencional com a adição de 5 % de éster etílico de óleo soja (b), dos óleos vegetais de coco (c) e mamona (d), Fig. (1).

## 2. MATERIAIS E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

### 2.1. FLUIDOS

As amostras de combustível diesel e de biodiesel de soja (éster etílico de óleo de soja), necessárias para a obtenção do B5, foram cedidas pelo Núcleo de Petróleo e Gás – NUPEG 2/ UFRN,

enquanto que as amostras dos óleos de mamona e coco foram adquiridas comercialmente em Natal/RN, Brasil.



**Figura 1 – Amostras de diesel convencional (a), biodiesel de soja B5 (b) e óleos de coco (c) e mamona (d) utilizadas para avaliação de lubrificidade HFRR.**

A massa específica, determinada pela medida da razão entre a massa e o volume de uma substância à temperatura e pressão especificadas, é uma importante propriedade a ser considerada para o biodiesel. Ela exerce grande influência no processo de injeção do combustível na câmara de combustão, na sua atomização e auto-ignição. O equipamento de injeção de combustível opera em um sistema cuja variável é a medição de volume. Uma elevada massa específica para o biodiesel, nesse caso, resulta em uma maior injeção de massa do combustível (Demirbas, 2005). Além disso, há também a necessidade de prevenção da formação de fumaça quando um motor diesel opera com potência máxima, que pode resultar em um aumento na razão de equivalência na câmara de combustão (Menezes *et al.*, 2006).

Demirbas (2005) comparou a massa específica do petrodiesel ( $878,8 \text{ kg/m}^3$ ) com as dos óleos vegetais de algodão, soja e girassol e também de seus ésteres, obtendo as respectivas massas específicas em  $\text{kg/m}^3$ : 914,8; 913,8; 916,1 (óleos) e 880,0; 885,0 e 880,0 (ésteres). Estes resultados mostraram que os óleos puros apresentam valores mais elevados que seus ésteres e que o uso de ésteres como combustíveis para motores do ciclo Diesel é mais adequado do que a utilização do óleo bruto.

De acordo com a Resolução N°4 da ANP de 2010 fornecida pela ANP (Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis), o diesel convencional e o biodiesel de soja fornecem valores de viscosidade, ponto de fulgor e massa específica inferiores aos limites estabelecidos. Segundo Knothe *et al.* (2006), a viscosidade é um parâmetro extremamente importante na avaliação da qualidade do biodiesel, pois ela afeta a atomização de um combustível dentro da câmara de combustão e, por fim, a formação de depósitos. Os valores limites de viscosidade cinemática são especificados para ambas as normas ASTM D-6751 (1,9 a 6  $\text{mm}^2/\text{s}$  a 40 °C) e EN 14214 (3,5 a 5,0  $\text{mm}^2/\text{s}$  a 40 °C). Moser *et al.* (2007) comprovaram que o aumento da viscosidade é acompanhado pelo incremento do conteúdo de combustível transesterificado de soja (0 a 100%) sobre o óleo diesel. Algumas características físico-químicas relevantes dos fluidos estão indicadas na Tab. (1).

**Tabela 1. Características físico-químicas dos fluidos combustíveis analisados, segundo caracterização do fornecedor (NUPEG 2/ UFRN).**

Amostra	Massa Específica (Kg/m <sup>3</sup> )	Viscosidade Cinemática (cSt) a 40°C	Tensão Superficial (mN/m)	Ponto de Fulgor (°C)
Biodiesel de Soja (B5)	828	2,9	22,53 ± 0,14	36,5
Diesel Convencional	821	2,6	26,15 ± 0,23	36
Óleo de Coco	918	24,7 <sup>a</sup>	24,64±0,28	207 <sup>a</sup>
Óleo de Mamona	956	258,3 <sup>b</sup>	31,97±0,06	290,6 <sup>c</sup>

<sup>a</sup> Araújo et al. (2009).

<sup>b</sup> Drummond et al. (2008).

<sup>c</sup> Sousa Junior et al. (2010).

As características físico-químicas do óleo de mamona apresentam valores superiores às do óleo de coco que, por sua vez, são superiores aos combustíveis diesel convencional e biodiesel de soja (B5). Em estudo da caracterização do óleo de coco e obtenção de seu biodiesel, Araújo et al. (2009) encontram uma predominância de ácido láurico (42,49%), elevada acidez e altos valores de viscosidade e porcentagem em ácidos graxos livres, características estas que são conferidas aos óleos brutos.

## 2.2. ENSAIO DE LUBRICIDADE POR SONDA DE DESLIZAMENTO ALTERNADO DE ALTA FREQUÊNCIA, HFRR

A lubricidade é um termo qualitativo que descreve a habilidade de um fluido afetar o *atrito entre* superfícies sob carga e com movimento relativo, bem como o *desgaste nessas* superfícies. Ela é avaliada pela *escara do desgaste*, em  $\mu\text{m}$ , produzida em uma esfera animada com deslizamento alternado contra um plano estacionário (ASTM D6079-04). Pode-se inferir da definição da ASTM que quanto maior a lubricidade, menor a escara do desgaste, assegurando eficácia ao filme lubrificante em sua ação de separação das superfícies sob movimento relativo.

Quando duas superfícies em contato deslizam uma sobre a outra, sob carga, a interação entre suas asperezas é responsável por gerar as forças de contato que se opõem ao movimento (conhecidas como forças de atrito), que têm parte de suas energias dissipadas na forma de calor, ruído e desgaste dos materiais envolvidos no contato. Se entre as superfícies houver um material servindo de interface entre o contato das superfícies e agindo de modo a diminuir estas forças de atrito, diz-se que o deslizamento é lubrificado [Hutchings (1992) *apud* Joaquim (2007)].

Em alguns sistemas lubrificados, o lubrificante pode não evitar completamente o contato entre as asperezas, entretanto, poderá reduzir a resistência das junções formadas. O filme lubrificante caracteriza-se por uma tensão de cisalhamento menor que a dos materiais das superfícies envolvidas. Essas relações entre essas duas tensões, do filme lubrificante e das superfícies e entre a espessura do filme e as asperezas são discutidas por Hutchings (1992), que as associa à deformação plástica das asperezas e ao coeficiente de atrito entre as superfícies.

Quando o contato entre as superfícies metálicas (esfera-plano) apresenta um percentual de filme próximo de zero significa que há uma queda de potencial no contato e, portanto as superfícies estão significativamente mais próximas. Uma vez que as superfícies estão mais afastadas, devido à presença do fluido com maior capacidade de lubrificação, o atrito será menor. Ou seja, o coeficiente de atrito no ensaio HFRR é função do percentual de filme de combustível ou óleo lubrificante formado entre as superfícies, e indica o nível de lubricidade do fluido analisado.

A lubricidade foi avaliada através de ensaios em uma máquina HFRR pertencente ao GET – Grupo de Estudos de Tribologia e Integridade Estrutural da UFRN. Neste equipamento, a quantidade de 2 mL de combustível ou óleo deve ser adicionada a um recipiente que contém o par tribológico em contato (esfera, 66 > HRC > 58,  $R_a = 0,05 \mu\text{m}$ , contra disco torneado, lapidado e polido,  $210 > HV_{0,03} > 190$ ,  $R_a = 0,02 \mu\text{m}$ , ambos de aço AISI E-52100). O ensaio HFRR possui deslizamento alternado de amplitude 1 mm e freqüência 50 Hz, durante 75 minutos com um total de 0,225 megaciclos. Após este tempo, a esfera é sacada do *locus* de ensaio e o excesso de óleo removido com papel absorvente. As dimensões da cratera de desgaste formada na superfície da esfera são avaliadas em um microscópio óptico com ampliação de 100 vezes.

A média aritmética dos diâmetros maior (x) e menor (y) da elipse da escara é o número que descreve o desgaste da esfera, a quem se associa o grau de lubricidade do combustível. Este número é chamado de WSD (Wear Scar Diameter) pela norma ASTM D 6079 (2004). Valores WSD altos indicam um maior desgaste da esfera e, portanto, um fluido de baixa lubricidade e vice-versa (Joaquim, 2007).

No plano laboratorial, para cada fluido combustível (biodiesel de soja B5, diesel convencional, óleos de mamona e coco), foram realizadas sete determinações, segundo as condições apresentadas na Tab.(2) (ASTM D-6079), verificando também a repetitividade dos dados de coeficiente de atrito, percentual de filme lubrificante, temperatura e diâmetro médio da escara de desgaste (WSD).

A Figura (2) apresenta o disco e a esfera posicionados nos respectivos suportes e a configuração do contato tribológico no equipamento HFRR. Na Figura (3) é apresentado o diagrama esquemático do equipamento HFRR, detalhando-se o posicionamento da amostra do fluido, do par esfera e disco e principais componentes. A Tabela (2) apresenta as condições de ensaios, de acordo com a norma ASTM D 6079 (2004), adotadas para as análises realizadas com biodiesel de soja (B5) e os óleos de mamona e coco, à temperatura de 60 °C.

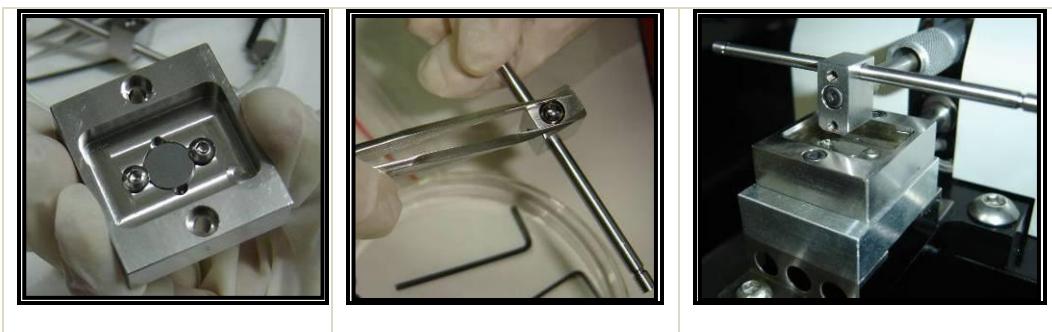


Figura 2 – Posicionamento do disco e da esfera nos suportes (a) e (b), respectivamente, configuração do contato no equipamento HFRR (c).

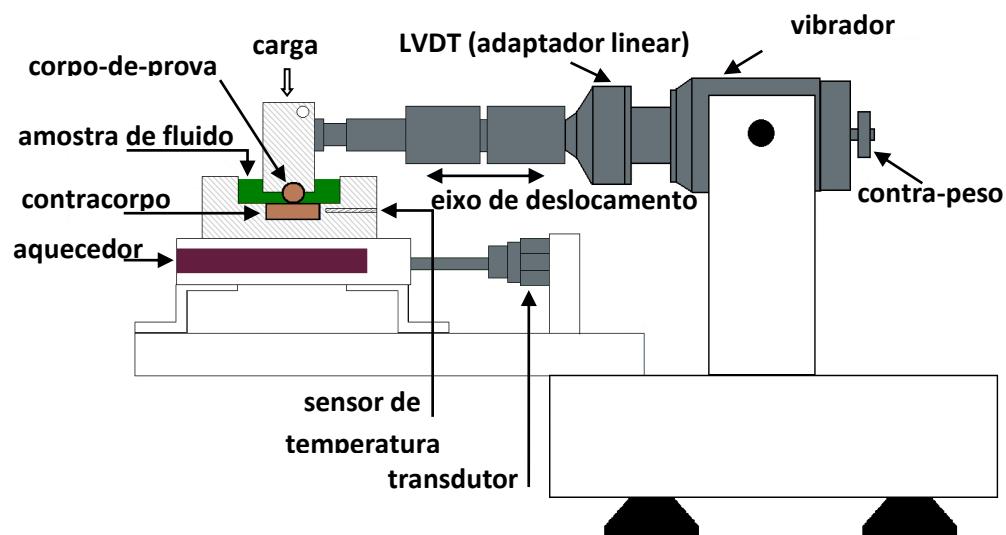


Figura 3 – Diagrama esquemático do ensaio no equipamento de lubricidade HFRR.

Tabela 2 – Condições de ensaio – Norma ASTM D 6079 -04 a 60 °C.

Volume do fluido (mL)	2,00 ± 0,20
Comprimento do golpe (mm)	1,00 ± 0,02
Frequência (Hz)	50 ± 1
Temperatura do fluido (°C)	60 ± 2
Umidade relativa (%)	> 30
Carga aplicada (N)	2,00 ± 0,01
Duração do ensaio (min.)	75,0 ± 0,1

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura (4) são apresentados os gráficos com as curvas de temperatura, porcentagem do filme e coeficiente de atrito para os ensaios realizados, respectivamente, com o biodiesel de soja B5, diesel convencional e óleos de mamona e coco (apenas uma repetição). O tempo de ensaio especificado pela Norma ASTM D-6079-04, foi de 4.500 segundos (75 minutos).

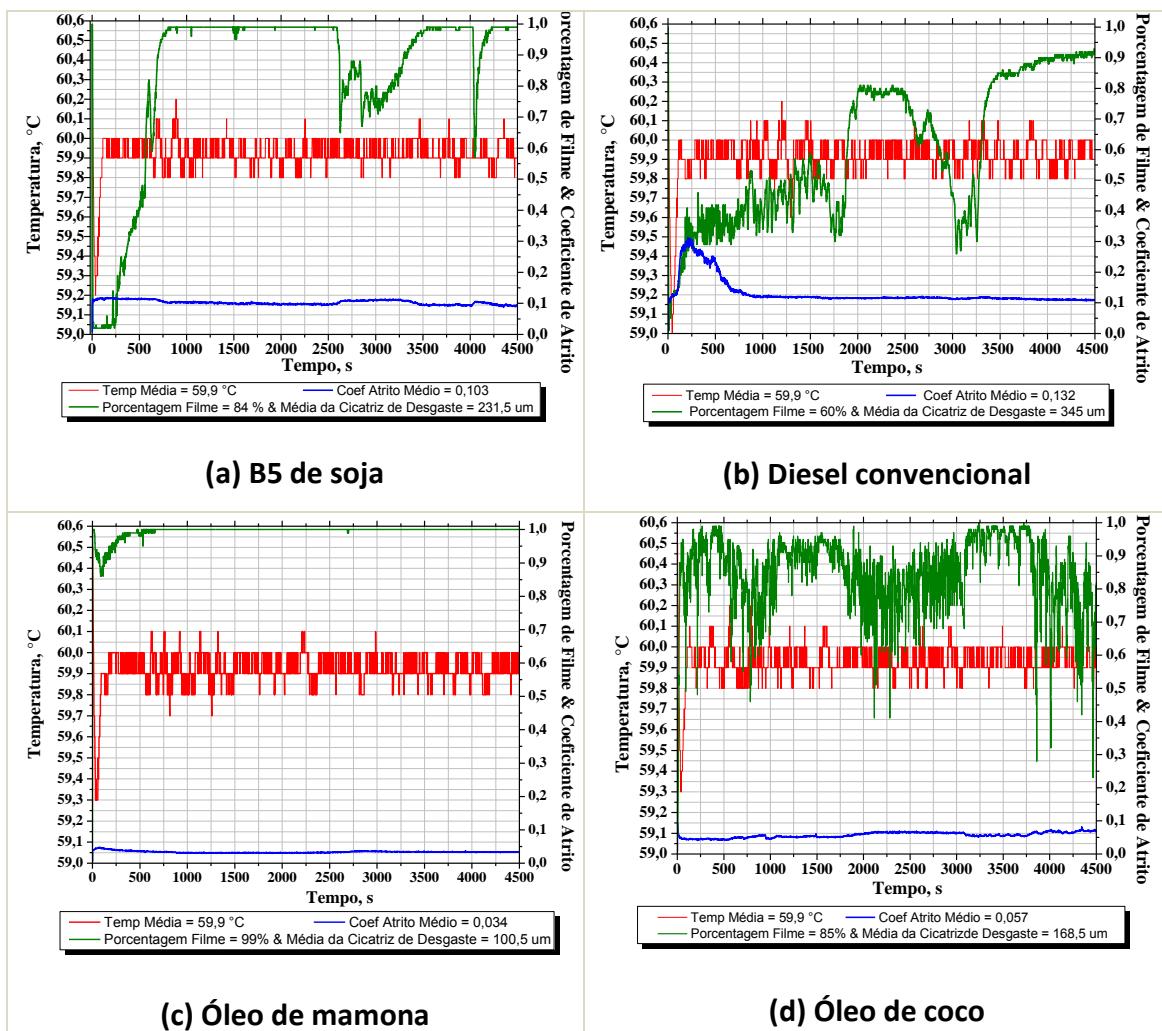
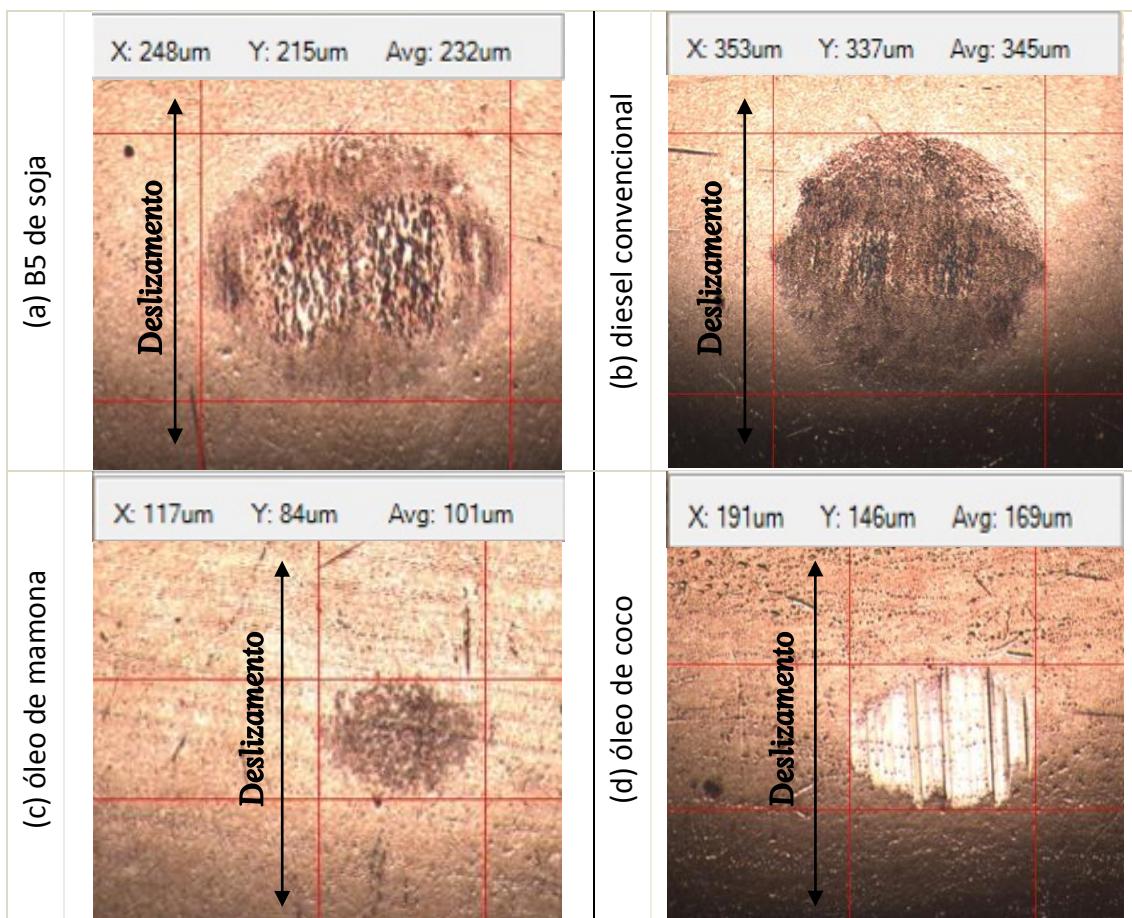


Figura 4 – Ensaio de lubricidade HFRR: B5 de soja (a), diesel convencional (b), óleo de mamona (c) e de coco (d).

Comparando-se as curvas de porcentagem de filme para o biodiesel B5 (Fig. (4a)) e para o óleo diesel convencional (Fig. (4b)), nota-se uma maior variação para este último, sugerindo que o filme lubrificante da amostra de B5 de soja possui mais estabilidade que para o diesel convencional;

enquanto que, comparando-se os óleos vegetais, a amostra de óleo de mamona (Fig. 4(c)) apresenta valores mais estáveis (100 % de filme lubrificante) que para a amostra de óleo de coco (Fig. (4d)).

As imagens de escara de desgaste, correspondentes aos ensaios de lubrificidade HFRR da Fig. (4) são apresentadas nas Fig. (5), as quais foram obtidas através de microscópio óptico com ampliação de 100 vezes. Os aspectos apresentados nas imagens indicam que se trata de um desgaste abrasivo com a formação de escara de desgaste na esfera de aço AISI 52100. Segundo as imagens analisadas, a maior escara é encontrada para o diesel convencional.



**Figura 5 – Imagem das escaras de desgaste correspondentes aos gráficos da Fig. (4). Diâmetro médio de escara medido para o B5 de soja (a), diesel convencional (b) e óleos de mamona (c) e coco (d).**  
**Ampliação: 100 vezes.**

Os resultados completos dos ensaios de lubrificidades HFRR para os fluidos analisados são apresentados pelos gráficos de temperatura na Fig.s (6-7); percentual de filme lubrificante, Fig. (8) e; coeficiente de atrito, Fig. (9). O resultado do diâmetro médio da escara de desgaste (WSD) é apresentado na Fig. (10). Nota-se que, nos gráficos (a) e (b) da Fig. (6), a dispersão dos dados ocorre mais acentuadamente nos primeiros 180 segundos (“running-in”) para todos os fluidos analisados. Entretanto, no gráfico (b), a dispersão é mais freqüente para o B5 de soja. É importante ressaltar que os resultados são apresentados apenas para dois intervalos de tempo (0 a 180 s e 181 a 360 s). Na

Figura (7) são apresentados os dados de temperatura para o ensaio completo (4500 segundos). Observa-se que, para este nível de janelamento, a dispersão é praticamente igual para todos os fluidos, apresentando valores médios de temperatura de  $59,92 \pm 0,1$  °C, sendo, portanto, mais difícil de identificar diferenças entre ineficaz.

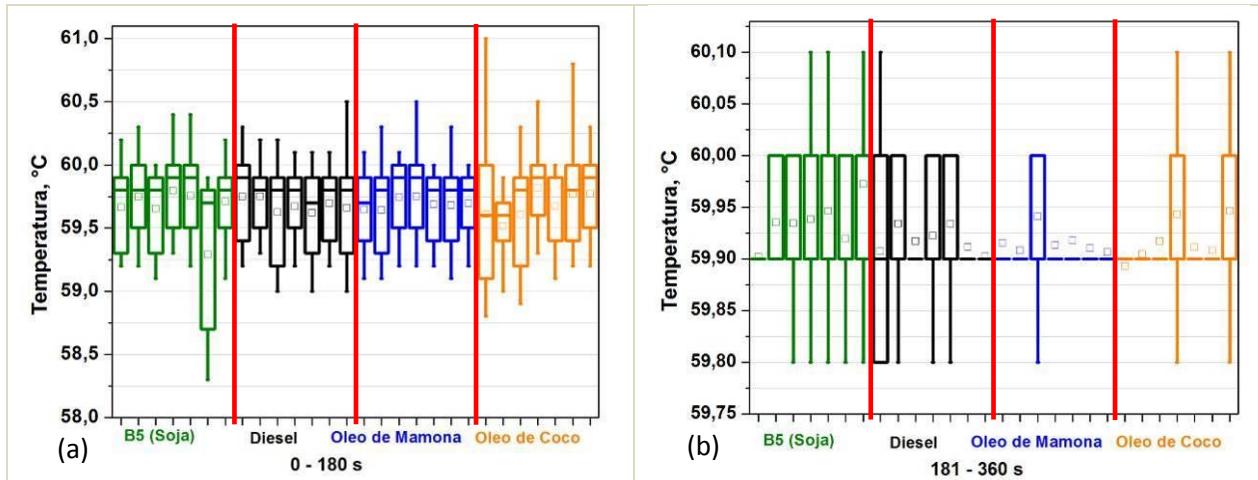


Figura 6 – Dados de temperatura do ensaio HFRR: (a) temperatura obtida durante o running-in (0 – 180 s) e (b) no regime estacionário (181 – 360 s) para os fluidos B5 de soja, diesel convencional e óleos de mamona e coco.

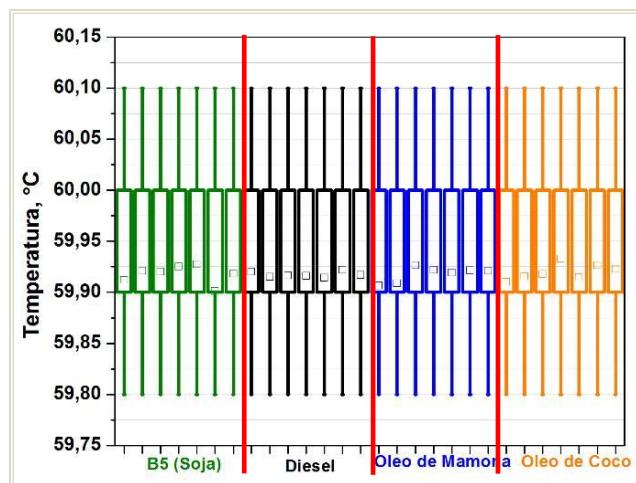


Figura 7 – Dados de temperatura do ensaio HFRR: Temperatura obtida durante todo o ensaio (4500 segundos) para o B5 de soja, diesel convencional e óleos de mamona e coco.

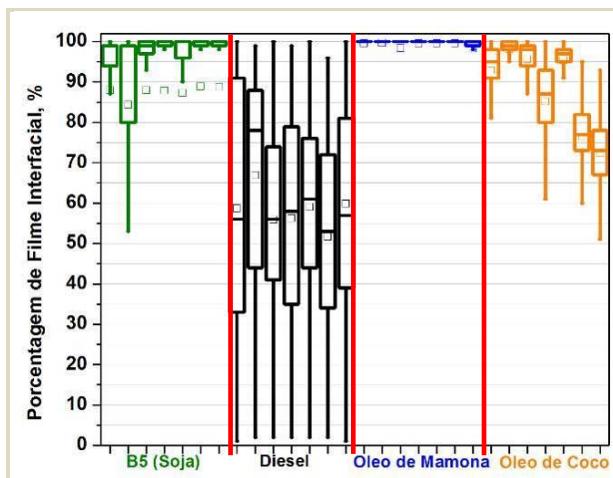


Figura 8 – Gráfico do percentual de filme lubrificante para o B5, diesel convencional e óleo de mamona e coco.

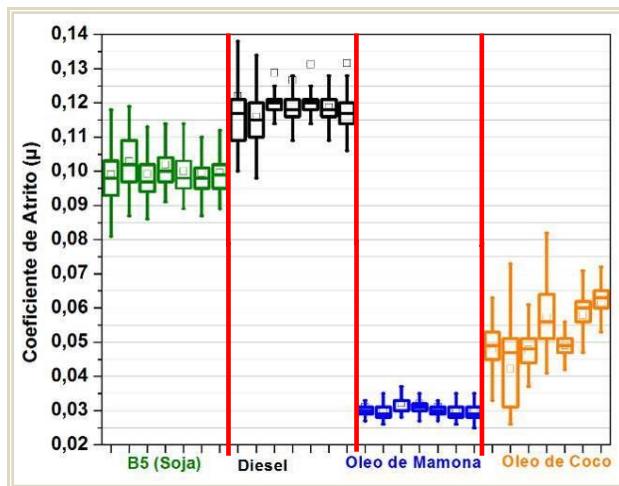
Conforme o gráfico da Fig. (8), o percentual do filme lubrificante dos fluidos analisados apresenta maior dispersão e valores relativamente baixos para o diesel convencional. Com base nestes dados, é esperado que o diesel também apresente maior coeficiente de atrito e desgaste. Ainda com relação aos dados do gráfico (Fig. 8), nota-se que B5 de soja obteve melhor resultado ( $88 \pm 2\%$ ) quando comparado ao diesel convencional ( $58 \pm 1\%$ ) e ao óleo de coco ( $88 \pm 9\%$ ), indicando que o seu filme hidrodinâmico parcial é mais estável que o produzido pelo diesel convencional e pelo óleo de coco. No caso do óleo de mamona, praticamente não há dispersão dos dados, obtendo uma excelente estabilidade de filme ( $99 \pm 1\%$ ).

A eficiência do filme lubrificante do fluido interfere diretamente no coeficiente de atrito. Quando não há espessura de filme suficiente para separar as superfícies antagônicas, o coeficiente de atrito aumenta, e com isto há contato entre as asperezas do par esfera-plano. A Figura (9) apresenta os resultados dos coeficientes de atrito obtidos para o B5 de soja ( $0,100 \pm 0,002$ ), diesel convencional ( $0,125 \pm 0,005$ ), óleos de mamona ( $0,031 \pm 0,001$ ) e coco ( $0,052 \pm 0,007$ ).

Pode-se verificar na Fig. (9) que o B5 de soja obteve os menores coeficientes de atrito que o diesel convencional. De acordo com o gráfico da Fig. (8), este resultado já era esperado. Uma vez que o percentual de filme do B5 foi maior, o coeficiente de atrito é menor. O mesmo ocorre quando os óleos de mamona e coco são comparados entre si, entretanto, os resultados para o B5 de soja são menos dispersos que os do óleo de coco.

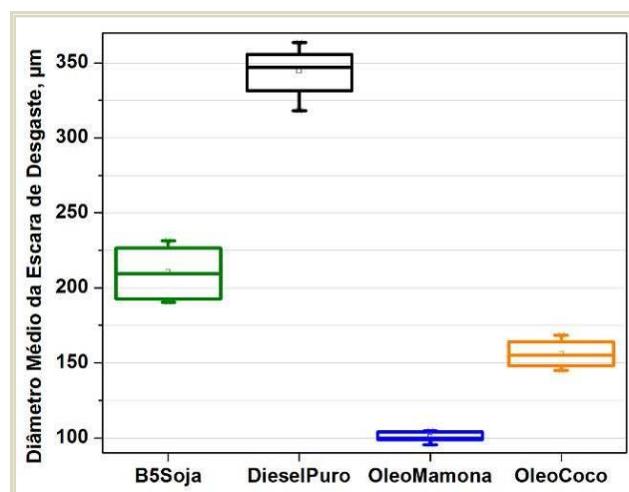
Na Figura (10) são mostrados os resultados dos valores de diâmetro da escara de desgaste (WSD) para os fluidos analisados. Comparando-se os gráficos das Figs. (8 e 9) com o gráfico da Fig. (10), pode-se inferir, neste caso, que o percentual de filme lubrificante é inversamente proporcional ao coeficiente de atrito, pois o diesel obteve menor percentual de filme lubrificante, maior coeficiente de atrito e, consequentemente, WSD ( $347,0 \pm 15,3 \mu\text{m}$ ), 40 % maior que para o B5 de soja WSD ( $209,5 \pm 15,6 \mu\text{m}$ ). Seguindo esta linha, os óleos de mamona e coco obtiveram,

respectivamente, WSD  $100,8 \pm 3,2 \mu\text{m}$  e WSD  $156,0 \pm 8,9 \mu\text{m}$  ( $\approx 16\%$  maior que o de mamona e  $\approx 15\%$  menor que o de B5).



**Figura 9 – Gráfico do coeficiente de atrito para o B5 de soja, diesel convencional e óleos de mamona e coco.**

E seguindo o critério apenas sob o aspecto de lubricidade, através dos resultados apresentados, sugere-se que o B5 (mistura diesel + 5 % de éster de soja) oferece melhores condições de lubrificação em um sistema mecânico e, como consequência, menor desgaste dos componentes do sistema de injeção (bico injetor, por exemplo), porém, o diesel convencional avaliado também pode ser classificado como adequado para utilização em motores do ciclo Diesel, uma vez que a sua escara de desgaste encontra-se dentro dos padrões aceitáveis ( $> 460 \mu\text{m}$ ); contudo, o seu nível de enxofre (1200 ppm) ainda é bem elevado para os limites permitidos pelas normas ambientais.



**Figura 10 – Gráfico do diâmetro médio da escara de desgaste (WSD) para o B5, diesel convencional e óleos de mamona e coco.**

Moser *et al.* (2007) avaliaram os ésteres metílicos de óleo de soja e com parcial hidrogenação (SME e PHSME) adicionados (0, 20, 50 e 100%) ao diesel convencional, comprovando que estes biodieséis apresentaram melhor estabilidade oxidativa, peso específico similar, mas suas lubricidades, viscosidade cinemática foram inferiores. Segundo estudo realizado por Suarez *et al.* (2009), os biodieséis de óleo de soja obtidos pelo processo de transesterificação e pirólise, foram misturados com o diesel de baixo e elevado os teores de enxofre (15 ppm e 50 ppm, respectivamente) em diferentes percentuais (0 a 100%). A lubricidade das misturas biodiesel, obtidas tanto por pirólise quanto por transesterificação, é superior à lubricidade de ambos os dieséis de baixo e elevado teores de enxofre, sugerindo-os como aditivos adequados à melhoria desta propriedade no diesel mineral.

Santana *et al.* (2009) avaliaram a propriedade de lubrificação de óleos de coco e mamona comparando com óleos minerais através de ensaio tribológico na configuração cilindro-contraplano utilizando aço AISI 52100. Os resultados de taxas de desgaste, através da perda mássica, demonstraram que os óleos vegetais proporcionaram menores taxas de desgastes que os óleos minerais, principalmente para os óleos de coco e de rícino não-refinados, os quais apresentaram percentuais de 88,89% e 66,67% inferiores aos dos óleos lubrificantes W40 e 20W50 SJ, respectivamente. Já o óleo de rícino refinado apresentou percentuais de 77,78% e 33,38 % inferiores em relação aos respectivos óleos minerais.

#### 4. CONCLUSÕES

De acordo com os resultados observados de percentual de filme lubrificante e coeficiente de atrito, a melhor lubricidade encontrada foi para a mistura diesel convencional + 5 % de éster de soja (B5), quando comparado ao diesel convencional (sem adição de biodiesel), sendo obtidos valores de WSD 40 % mais baixos que para o diesel convencional.

Com base na propriedade física de massa específica, pode-se afirmar que o biodiesel de soja (B5), o óleo de mamona e de coco promovem uma separação mais eficiente das superfícies lubrificadas, sendo tal fato comprovado através da curva de espessura de filme interfacial.

Considerando apenas os resultados de desempenho tribológico (lubridade), considera-se que o biodiesel B5 de éster de soja promoverá menos desgaste para o sistema de injeção, em relação ao diesel convencional (diesel mineral sem adição de biodiesel).

Quando comparado ao desempenho da lubricidade dos óleos vegetais de mamona e coco, o B5 de soja apresenta lubricidade inferior aos mesmos (WSD 30 % e WSD 15 % maiores, respectivamente).

De maneira geral, os óleos vegetais e o biodiesel de soja (B5) possuem características lubrificantes superiores ao diesel convencional.

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

1. AGARWAL, D., KUMAR, L., AGARWAL, A.K. **Performance evaluation of a vegetable oil fuelled compression ignition engine.** Renewable Energy n.33 p.1147 - 1156, 2008.
2. ARAÚJO, G. S., CARVALHO, R.H.R. DE SOUSA, E.M.B.D. **Produção de Biodiesel a partir de óleo de coco (cocos nucifera)**. Anais do 2º International Workshop: Advances in Cleaner Production. Key Elements For A Sustainable World: Energy, Water And Climate Change. São Paulo, Brazil, 2009.
3. ASTM standard D6079. **Standard test method for evaluating lubricity of diesel fuels by the high-frequency reciprocating rig (HFRR).** ASTM – American Standard Test Materials, West Conshohocken, PA, Estados Unidos da América, 2004.
4. ASTM standard D975. **Standard specification for diesel fuel oils.** ASTM – American Standard Test Materials, West Conshohocken, PA, Estados Unidos da América, 2010.
5. BOVINGTON, C., CAPROTTI, R., MEYER, K., SPIKES, H.A. **Development of a laboratory test to predict properties of diesel fuels and its application to the development of highly refined diesel fuels.** 9<sup>th</sup> International Colloquium, ecological and economic aspects of tribology, Esslingen, Germany, 1994.
6. CEN diesel fuel specification, **European petrodiesel standard EN 590.** Beuth-Verlag, Berlin, Alemanha, 2004.
7. DEMIRBAS, A. – **Progress in energy and combustion science.** 2005, 31, 466p.
8. DRUMMOND, A.R.F., MELO, G.O., ALMEIDA, L.M., MELO, J.A. **Análises físico-químicas de óleos vegetais misturados ao diesel estão conforme o regulamento da ANP: adulteração ou possibilidade de uso como combustível?** Anais do III Congresso Brasileiro de Mamona Energia e Ricinoquímica. Salvador- BA, Brazil, 2008.
9. FREITAS, S. M.; FREDO, C. **Biodiesel à base de óleo de mamona: algumas considerações.** Revista informações econômicas, São Paulo, v. 35, n. 1, p. 37-42, 2005.
10. HUTCHINGS, I.M. **Tribology: friction and wear of engineering materials.** Department of Materials Science and Metallurgy – University of Cambridge, Ed. Edward Arnold, 1992.
11. JOAQUIM, C.R.O. **Verificação do comportamento da lubridade do óleo diesel veicular com adição de etanol.** Dissertação de mestrado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.
12. KNOTHE, G., GERPEN, J.V., KRAHL, J., RAMOS, L.P. **Manual de Biodiesel.** Ed. Edgard Blücher, São Paulo, Brasil, 2006.
13. LACEY, P.I., MASON, R.L. **Fuel lubricity: Statistical analysis of literature data.** SAE Tech Pap Ser. 1999-01-1479, 1999.
14. LÔBO, I.P., FERREIRA, S.L.C. **Biodiesel: parâmetros de qualidade e métodos analíticos.** Revista Química Nova, vol.32, n°6, p. 1596-1608, 2009.
15. MARTINS, J. **Motores de combustão interna.** 1<sup>a</sup> edição, Publindústria Edições Técnicas, Portugal, 2005.
16. MAZIERO, J.V.G., CORRÊA, I.M., ÚNGARO, M.R., BERNADI, J.A., STORINO, M. **Desempenho de um motor diesel com óleo bruto de girassol.** R. Bras. Agrociência, Pelotas, v. 13, n. 2, p. 249-255, 2007.

17. MENEZES, E.W., SILVA, R., VESES, R.C., ORTEGA, R.J.C. **Effect of others and ether/ethanol additives on the physicochemical properties of diesel on engine tests.** Fuel85, p. 815-822, 2006.
18. MOSER, B.R., HAAS, M.J., WINKLER, J.K., JACKSON, M.A. ERHAN, S.Z., LIST, GR. **Evaluation of partially hydrogenated methyl esters of soybean oil as biodiesel.** Eur. J. Lipid Sci. Technol. 109, pp. 17-24, 2007.
19. POSSIDONIO, E. R. **Otimização das condições de síntese de biodiesel de óleo de soja, visando atender normas de qualidade da ANP.** Fundação de Estudos e Pesquisas Agrícolas e Florestais, 33f., 2008.
20. SANTANA, J.S., FARIAS, A.C.M., SANTANA, J.S., BARBOSA, C.R.F., MEDEIROS, J. T. N. **Estudo Tribológico De Óleos Biodegradáveis De Coco E De Rícino Através De Ensaios Abrasivos.** Anais do Congresso Íbero-American de Engenharia Mecânica, 2009.
21. SOUSA JUNIOR, F.S., SOUZA, L., DIAS, A.G., EVANGELISTA, J.C., DIAS, N.S. **Qualidade do óleo da mamona cultivada em diferentes altitudes no Rio Grande do Norte – Brasil.** Revista Verde (Mossoró – RN – Brasil) v.5, n.5, p. 12-17, 2010.
22. SUAREZ, P.A.Z., MOSER, B.R., SHARMA, B.K., ERHAN, S.Z. **Comparing the lubricity of biofuels obtained from pyrolysis and alcoholysis of soybean oil and their blends with petroleum diesel.** Fuel 88, PP. 1143–1147, 2009.
23. WAIN, K.S., PEREZ, J.M., CHAPMAN, E., BOEHMAN, A.L. **Alternative and low sulfur fuel options: boundary lubrication performance and potential problems.** Tribology International, n° 38, p.313 – 319, 2005.