

UTILIZAÇÃO DE ÓLEO DE GIRASSOL COMO COMBUSTÍVEL EM UNIDADE DE POTÊNCIA MONOCILINDRO CICLO DIESEL

Hevandro Colonhese Delalibera (UEPG) E-mail: hcdelalibera@yahoo.com.br

Pedro Henrique Weirich Neto (UEPG) E-mail: lama1@uepg.br

Johnny Martini (UEPG) E-mail: johnny_martini@hotmail.com

Resumo: Neste trabalho, em um micro-tractor monocilindro de injeção direta realizaram-se ensaios de 50 h de duração, utilizando 100% de óleo de girassol como combustível em comparação com o petrodiesel. No primeiro ensaio (E-1), utilizou-se óleo vegetal entrando a temperatura ambiente no sistema de injeção do motor; no segundo (E-2), aqueceu-se o óleo a uma temperatura de aproximadamente 90°C, e no terceiro (E-3) utilizou-se somente petrodiesel. No primeiro ensaio após 50 h foi constatada a queima da junta de cabeçote. Para os ensaios E-1 e E-2 foi encontrado um aumento da pressão de compressão e para E-3 redução. A carbonização do bico injetor do E-2 foi 81,5% menor que a do E-1 e 5,8% maior que E-3. A carbonização do sistema de admissão do E-2 foi 51,7% menor que do E-1 e 36,2% maior que E-3. A carbonização do sistema de exaustão do E-2 foi 33,4% menor que a do E-1 e 34,4% maior que E-3. Para a câmara de combustão a carbonização do E-1 foi praticamente igual ao do E-2, sendo estes em torno de 50% maior que E-3. Com relação ao consumo de combustível do E-1 e do E-2 foram respectivamente de 2,3% e 0,7% maiores que o E-3. No caso do óleo lubrificante, houve contaminação por óleo vegetal combustível nos dois primeiros ensaios. No geral o E-2 mostrou-se melhor que o E-1.

Palavras-chave: Óleo vegetal combustível, carbonização, motor

USE OF SUNFLOWER OIL AS FUEL IN A SINGLE CYLINDER DIESEL CYCLE ENGINE

Abstract: In this work, on a micro-tractor single cylinder direct injection trials were carried out for 50 h, using 100% sunflower oil as fuel compared to petroleum diesel. In the first trial (E-1), we used vegetable oil entering the system at air temperature in the injection system of the engine; in the second (E-2), the oil was heated at a temperature of about 90°C; and in the third (E-3) only petrodiesel was used. In the first test after 50 h, a burning of the head gasket was found. To the trials E-1 and E-2 an increase in the compression pressure was found and a reduction for E-3. The carbonization of the nozzle of the E-2 was 81,5% lower than the E-1 and 5,8% higher than E-3. The carbonization of the intake system of the E-2 was 51,7% lower than the E-1 and 36,2% higher than E-3. The carbonization of the exhaust system E-2 was 33,4% lower than the E-1 and 34,4% higher than E-3. For the combustion chamber the carbonization of the E-1 was almost equal to the E-2, which are around 50% higher than E-3. Regarding the fuel consumption of the E-1 and E-2 were respectively 2,3% and 0,7% higher than the E-3. The lubricating oil was contaminated by vegetable oil fuel in the first two tests. Overall the E-2 was better than the E-1.

Keywords: Vegetable oil fuel, coking, engine

1. INTRODUÇÃO

O alto custo proporcionado pelo uso do petróleo à economia mundial e ao ambiente tem forçado e viabilizado as pesquisas em busca de fontes alternativas de energia. A maior procura é por combustíveis que possam pura e simplesmente substituir os derivados do petróleo sem alterações onerosas nos projetos das máquinas térmicas já existentes. Com avanço reconhecido da tecnologia do álcool, o Brasil tenta atualmente encontrar substituto para o petrodiesel, derivado do petróleo que pela sua qualidade é indicado para altas potências, sendo o Brasil um importador de tal combustível, o qual ainda é oferecido no mercado nacional de forma subsidiada.

Com relação aos combustíveis renováveis que podem substituir o petrodiesel, a pesquisa tem voltado suas atenções para uma antiga opção, os derivados dos óleos vegetais. Observa-se que estes, transformados (biodiesel) ou não, estão sendo largamente utilizados em

tratores agrícolas e caminhões sem critério algum, principalmente sem transformação, por ser em alguns casos de fácil aquisição e menor custo. Porém, os trabalhos com relação à utilização destes têm mostrado algumas desvantagens, como perda de potência, aumento de consumo, redução da vida útil do motor, entre outras. O que se desenha, praticamente, são estudos de caso, onde a combinação de diferentes matérias-primas, isto é, oleaginosas que possuam composição físico-química do óleo distinta, somados aos processamentos de purificação, resultam em uma infinidade de especificações de óleos combustíveis. Por isso, no caso dos óleos vegetais, ainda não estão bem definidos os efeitos de sua utilização nos motores (ENGLER et al., 1983).

Considerando que estes combustíveis alternativos são utilizados em projetos de motores do tipo ciclo Diesel, quando se volta aos princípios no qual a máquina de Diesel foi idealizada, isto é, baseando-se no teorema ou ciclo de Carnot, onde o calor da mudança isotérmica de um “gás” é convertido em trabalho, sabe-se que o motor de ignição por compressão exige que o combustível esteja na forma, ou o mais próximo possível, de um gás e entre em ignição praticamente todo a uma mesma temperatura (KNOTHE, 2006). Porém, como este sistema foi idealizado para funcionar com petrodiesel, quando se usa óleo vegetal, por este possuir viscosidade muitas vezes maior, o processo de atomização feito pelo bico injetor não ocorre adequadamente. Sendo assim, a redução da viscosidade pode mitigar este problema, sendo que tal redução pode ser obtida de várias formas, como pelo aquecimento do combustível (RYAN III et al., 1984).

2. MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Mecanização Agrícola (Lama) da Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG) em parceria com a Retificadora de Máquinas (Retimaq), o Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI) e o Centro de Ensino Superior dos Campos Gerais (CESCAGE). Utilizou-se como unidade experimental um micro-trator monocilindro, ou trator de rabiça conforme descrição da Tabela 1.

Tabela 1 - Especificações do motor

| | |
|-------------------------------------|---|
| Fabricante / Modelo | Kubota – Tekko do Brasil / Tobatta Diesel – KR - 90 |
| Número de cilindros | 1 |
| Diâmetro pelo deslocamento | 90 x 90 mm |
| Volume deslocado | 0,570 L |
| Potência máxima | 6,7 kW a 167,5 rad s ⁻¹ (9 cv a 1600 r m ⁻¹) |
| Taxa de compressão | 20 |
| Sistema de injeção | Direta |
| Capacidade de óleo lubrificante | 2,5 L |
| Capacidade de água de arrefecimento | 4,0 L |

Como combustível foi utilizado óleo de girassol (*Helianthus annuus*, L.), sendo este obtido por extração mecânica ou prensagem a frio dos grãos (grão com pericarpo). Este óleo passou apenas por processo de decantação, seguido de filtragem simples, não sendo procedido nenhum tipo de processamento de purificação. Este óleo foi extraído e cedido pelo Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR), unidade de experimental de Ponta Grossa.

Deste óleo retiraram-se três amostras, sendo uma enviada para análise de determinação de ácidos graxos, a segunda para levantamento de parâmetros de qualidade de combustível e a

terceira foi coletada para a determinação da curva de viscosidade alterada por processo térmico. Esta foi procedida nas temperaturas de 25, 38, 50, 70 e 90°C, utilizando um viscosímetro de Ostwald, com tubo capilar de Cannon-Frenske de 150, para líquidos transparentes, tendo como referência a viscosidade da água.

Antes de começar o ensaio, o motor foi retificado completamente, onde todos componentes permaneceram até o fim dos ensaios. Nas avaliações de bico injetor, foram realizados os testes padrão para sistema de injeção Diesel, que são: determinação visual da atomização do combustível (em alta pressão e baixa pressão); pressão de abertura (comparada com a referência de fábrica); teste de estanquidade ou vedação (5 s à pressão do sistema de 15 a 20 kgf cm⁻² menor que a pressão de abertura). Todos os ensaios foram realizados em bancada, utilizando fluido de calibração para sistema de injeção Diesel (Castrol Ultra seni 4113®). O elemento de ponta injetora quando novo foi montado com 5 kgf cm⁻² acima da pressão de referência devido à queda do valor de pressão de abertura com o ajuste no regime de funcionamento das partes móveis.

Após a montagem do motor, mensurou-se a pressão de compressão através de um manômetro analógico instalado no lugar do bico injetor. Posteriormente o motor foi acoplado no trator onde passou por um período de dez horas de funcionamento para pré-ajuste das partes móveis e, após esta, o óleo lubrificante foi trocado para início do ensaio. Neste momento também foram feitas as adaptações do sistema de conversão da alimentação do combustível. Este sistema foi idealizado para proporcionar o funcionamento do motor somente com petrodiesel ou com óleo vegetal, não permitindo misturas.

A metodologia de trabalho consistiu na ignição do motor sempre com petrodiesel (PANP N° 310/2001 e RANP N° 15/2006 tipo interior – B) por um período de 10 min com o acelerador em posição de aceleração máxima, para aquecimento do motor. Após este período alternava-se o combustível. Durante o período de funcionamento, no desenvolvimento dos trabalhos a campo, procurou-se manter sempre o motor em aceleração máxima. Antes de desligar o motor, passava-se para alimentação com petrodiesel pelo mesmo período de 10 min, para que a bomba e o bico injetor voltassem a trabalhar com petrodiesel. Esta metodologia foi utilizada para evitar problemas com ignição (partida) com o motor frio além de problemas de oxidação e corrosão dos elementos do sistema de injeção.

O trabalho constituiu-se de três ensaios, sendo dois com óleo vegetal combustível e um com petrodiesel. No primeiro, chamado de ensaio um (E-1), o óleo combustível entrou no sistema de injeção do motor com temperatura ambiente. No segundo ensaio (E-2), aqueceu-se o óleo antes de entrar no sistema de injeção e no ensaio três (E-3) utilizou-se apenas petrodiesel. Para o experimento E-1, confeccionou-se um reservatório para o óleo vegetal, mantendo-se o reservatório original para petrodiesel. Utilizou-se para o circuito de óleo vegetal uma bomba, um filtro, um tubo em “T”, para retorno do excesso de combustível bombeado para o reservatório, além de duas válvulas para proceder a escolha do combustível.

Para o experimento E-2 utilizaram-se as adaptações feitas no primeiro ensaio, com a adição de um sistema de aquecimento. O sistema de aquecimento consistiu em um conjunto de espirais confeccionadas com tubo de 3/8 de polegada de diâmetro, inseridas dentro do tubo de exaustão dos gases, sendo um total de 16 espiras, com diâmetro de 53°mm distribuídos em um espaço de 255 mm. Este foi idealizado, pois o interior do escape atingia temperaturas em torno de 190°C (aceleração máxima, sem carga). O intuito do aquecimento do óleo vegetal utilizado como combustível no E-2 foi diminuir a viscosidade do mesmo, pois segundo Ryan III et al. (1984), com a redução da viscosidade reduz-se o esforço do sistema de injeção e consequentemente o desgaste, além de melhorar a atomização do combustível pelo bico

injetor na câmara de combustão.

A temperatura idealizada para aquecimento do óleo vegetal foi de 150°C, pois segundo Inoue et al. (2005) até esta temperatura ocorre o maior decréscimo de viscosidade para o óleo de girassol. Ryan III et al. (1984) recomendaram temperaturas em torno de 140°C, encontrando viscosidades em torno de 5 mm² s⁻¹ (cSt). Já Inoue et al. (2005) encontraram para o óleo de girassol uma viscosidade de aproximadamente 9,93 mm² s⁻¹ a 150°C, quando comparado com o petrodiesel (3,8 cSt), à temperatura de 38°C, é aproximadamente 2,6 vezes maior. No caso do óleo de girassol utilizado, à temperatura de 38°C tem-se 32 mm² s⁻¹ de viscosidade, sendo esta aproximadamente oito vezes maior que a do petrodiesel, a esta mesma temperatura. Para o caso deste experimento, como mostra a Figura 1, a temperatura de 90°C encontrou-se uma viscosidade de 6,8 cSt, a qual ainda é superior a viscosidade do petrodiesel.

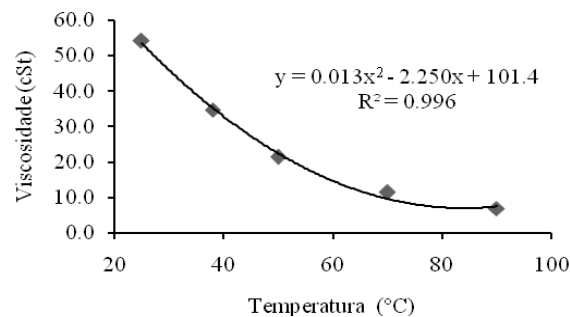


Figura 1 - Curva de viscosidade determinada para o óleo de girassol utilizado.

A temperatura do sistema foi medida com a instalação de sensores termopar do tipo “K”, modelo MTK-02[®] (marca registrada Minipa), específicos para imersão em líquidos. As leituras dos sensores foram realizadas com um multímetro modelo ET-1400[®] (marca registrada Minipa). O sensor termopar foi instalado na entrada da bomba injetora nos três ensaios.

Para manter o motor sobre carga durante o tempo funcionamento com óleo vegetal, foram realizados trabalhos com enxada rotativa em faixa de trabalho de 0,9 m para E-1 e E-2, compondo a área em sua maioria por LATOSSOLO com material de origem de Folhelho Ponta Grossa e, para o E-3, grande parte do trabalho foi realizado com roçadora. Cada ensaio teve duração de 50 horas de trabalho, onde posteriormente foi realizada avaliação do motor. Para isso desmontou-se a unidade de potência por completo, medindo-se a carbonização para pistão, anéis e cabeçote (câmara de combustão), para válvula e duto de escape no cabeçote, além de válvula e duto de admissão no cabeçote. Esta foi procedida retirando-se os materiais aderidos nos componentes e posteriormente suas massas foram medidas em balança digital com acurácia de 0,005 g.

O óleo lubrificante foi trocado por um novo no início de cada ensaio, sendo utilizado óleo com especificação D SAE 30 (monovisco), API – CF (Shell Rimula[®]). No final de cada ensaio retirou-se uma amostra, a qual foi enviada para laboratório especializado da Shell do Brasil para análise. O consumo de combustível foi estimado pelo número de litros adicionados no tanque (consumido), dividido pelo número de horas de funcionamento, obtendo-se o consumo horário médio (L h⁻¹) para os três ensaios.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com a Tabela 2, pode-se observar que os resultados da caracterização dos ácidos graxos do óleo utilizado em relação aos resultados citados na literatura, que mesmo sendo da mesma cultura, ocorrem grandes variações em sua composição química. Essas variações são decorrentes de uma diversidade de fatores, que podem ser intrínsecos a planta, como por exemplo o melhoramento genético e a posição da semente em relação ao capítulo (MARCOS FILHO, 2005). A influência de fatores extrínsecos, ou fatores do ambiente, segundo Castro et al. (2006) são fatores tão importantes quanto os fatores intrínsecos na determinação da composição dos ácidos graxos, quando dentro de uma mesma cultura. De acordo com Petcu et al. (2001), a fase mais importante da influência do ambiente na composição de ácidos graxos, para o caso do girassol, é a fase de enchimento de grãos.

Trabalhos realizados por Petcu et al. (2001) demonstraram que quando há estresse hídrico, as variações nos ácidos graxos são mais representativas para os ácidos insaturados, sendo estas alterações não significativas para os ácidos saturados. Com relação à nutrição, Wendt et al. (2005) comentam que existe influência positiva da fertilidade e da disponibilidade de nutrientes no teor de óleo para a cultura do girassol.

Tabela 2 - Ácidos graxos que fazem parte da composição do óleo utilizado e referências para comparação com o obtido por outros autores para óleo de girassol.

| Ácido graxo | Utilizado (g kg ⁻¹) | Ryan III et al. (1984) (g kg ⁻¹) | Peterson et al. (1983) (g kg ⁻¹) | Hancsók et al. (2004) (g kg ⁻¹) |
|--------------------|---------------------------------|--|--|---|
| Mirístico (14:0) | - | 5,0 | - | 1,0 |
| Palmítico (16:0) | 134,5 | 58,0 | 64,0 | 82,0 |
| Esteárico (18:0) | 82,7 | 48,0 | 42,0 | 36,0 |
| Oléico (18:1) | 216,7 | 183,0 | 239,0 | 277,0 |
| Linoléico (18:2) | 494,6 | 686,0 | 614,0 | 584,0 |
| Linolênico (18:3) | 2,9 | 2,0 | 30 | 5,0 |
| Araquídico (20:0) | 7,3 | - | - | 2,0 |
| Eicosenóico (20:1) | 7,2 | - | - | 2,0 |
| Behênico (22:0) | 25,0 | 8,0 | - | 6,0 |
| Erúcido (22:1) | 22,9 | 5,0 | - | - |
| Lignocérico (24:0) | 6,2 | 5,0 | - | 2,0 |

Para todos os casos demonstrados na Tabela 2, pode-se observar que o ácido graxo predominante para a cultura do girassol é o linoléico, seguido do ácido oléico (70% da composição do óleo). Ryan III et al. (1984) realizando testes de oxidação térmica em injeção, encontraram correlação positiva com a quantidade de ácidos graxos insaturados e quantidade de depósitos formados, onde a quantidade e o número de insaturações é fator importante. Com esta, pode-se dizer que o óleo de girassol utilizado como combustível é propenso a formação de depósitos, pela sua alta relação de ácidos graxos insaturados. Outro fator importante é com relação a quantidade de ácidos graxos saturados de cadeia carbônica longa, como os ácidos araquídico, behênico e lignocérico, (3,8% da composição do óleo utilizado). De acordo com Bobbio & Bobbio (1985), estes podem ser enquadrados no grupo das ceras, pois possuem ponto de fusão em torno de 80°C e são resistentes a todos os tipos de degradação, favorecendo a formação de depósitos.

Com relação aos parâmetros de qualidade combustível (Tabela 3), este óleo possui moderado índice de corrosividade e viscosidade cinemática extremamente elevada, comparado com o padrão da ASTM para petrodiesel (1,9 a 4,1) (DUNN, 2006) e para os padrões de óleo vegetal (E DIN 51 605). Segundo Ryan III et al. (1984), os valores altos de viscosidade do óleo combustível causam problemas com o sistema de injeção, como oscilação, sobre-pressões e umedecimento da ponta do bico injetor, resultando na formação de depósitos. O autor ainda comenta que outro fator importante é o ângulo do cone de injeção do combustível, onde quanto maior a viscosidade, menor o ângulo do cone de injeção, fator importante na mistura ar combustível para motores de injeção direta, no qual se enquadra o motor utilizado neste experimento.

Com relação aos resíduos de carbono, este mostra-se normal de acordo com os padrões de qualidade de óleo vegetal, porém quando comparado com os padrões ASTM (DUNN, 2006) de combustível, o qual exige teores inferiores a 0,05%, neste caso (0,42%) pode-se considerar muito elevado. Para o caso do índice de iodo, Ryan III et al. (1984) encontraram que tais índices sendo elevados em óleos com maiores quantidades de ácidos graxos saturados causam menor carbonização. O poder calorífico superior, segundo Peterson et al. (1983), Engler et al. (1983) e Bettis et al. (1982), é inferior a média encontrada para todos os tipos de petrodiesel, sendo isso normal para todos os óleos vegetais. Os parâmetros para o ponto de fulgor, segundo Brasil (1999), dizem respeito à segurança para o manuseio do produto (inflamação), podendo indicar também contaminação do óleo combustível por produtos mais leves. A existência de qualquer quantidade dos elementos fósforo, sódio, potássio, cálcio e magnésio, para o caso de óleo combustível, pode ser considerada prejudicial ao motor.

Tabela 3 - Parâmetros de qualidade combustível analisadas para o óleo de girassol utilizado e especificações recomendadas para óleo vegetal.

| Ensaio | Resultado | E DIN 51 605 | Método |
|--|-------------|--------------|---------------|
| Aspecto e cor ¹ | LII/Amarelo | - | Visual |
| Corrosividade ao cobre 3h a 50 °C ³ | 1a | - | NBR 14.359 |
| Massa específica a 15 °C (kg m ⁻³) | 917,2 | 900-930 | NBR 7.148 |
| Viscosidade cinemática a 40 °C (mm ² s ⁻¹ - cSt) | 37,68 | 36 (máx) | NBR 10.441 |
| Microresíduo de carbono (% massa) | 0,42 | 0,4 (máx) | ASTM D 4.530 |
| Índice de iodo (gl ₂ 100g ⁻¹) | 115 | 95-125 | EN 14.111 |
| Poder calorífico superior (J g ⁻¹) | 39470 | 36000 (min) | ASTM D 240 |
| Ponto de fulgor corrigido (°C) | 277 | 220 (min) | NBR 11.341 |
| Ponto de fluidez (°C) | -7,0 | - | NBR 11.349 |
| Insolúveis (mg kg ⁻¹) | 0,02 | - | AOCS ca 3a-46 |
| Fósforo - P (mg kg ⁻¹) ² | < 2,0 | 12 (máx) | EN 14.107 |
| Sódio - Na (mg kg ⁻¹) ² | < 5,0 | - | EN 14.538 |
| Potássio - K (mg kg ⁻¹) | 5,6 | - | EN 14.538 |
| Cálcio - Ca (mg kg ⁻¹) | 2,9 | 20 (máx) | EN 14.538 |
| Magnésio - Mg (mg kg ⁻¹) ² | < 2,0 | 20 (máx) | EN 14.538 |

1 - Límpido e isento de impurezas; 2 - Limite de detecção do equipamento - 2,0 e 5,0 mg kg⁻¹; 3 - FP (Recentemente polido), 1a (Levemente manchado de laranja claro), 1b (Levemente manchado de laranja escuro)

No E-1, o sensor termopar instalado na entrada da bomba injetora indicou temperatura

do óleo entre 38 a 50°C (após período de 10 min para troca de combustível), com viscosidade de 34,7 a 21,3 cSt, e quando comparado com o petrodiesel (3,8 cSt a 38°C) é de 9,1 e 5,6 vezes maior.

Para E-2, os resultados obtidos com o sistema de aquecimento do óleo de girassol mostraram que as adaptações realizadas foram pouco eficientes em relação ao indicado por Inoue et al. (2005) e Ryan III et al. (1984), que recomendam temperaturas de 150 e 140°C para redução da viscosidade, sendo a temperatura encontrada de aproximadamente 90°C (trabalhando com enxada rotativa). Porém, de acordo com a análise do óleo, a viscosidade é de 6,8 cSt, o que de acordo com a literatura é um valor interessante. Estas diferenças de viscosidade do óleo de girassol, quando comparado com a literatura, mostra que a composição físico-química do óleo realmente exerce grande influência na viscosidade. Outro fator interessante é com relação a temperatura em que o combustível chega ao bico injetor, a qual não foi mensurada, pois este é o local onde a viscosidade apresenta maior influência.

Após 50 horas de trabalho, o E-1 foi interrompido devido a problemas com vazamento de pressão na junção entre o cabeçote e o bloco, onde se constatou a queima da junta. Mesmo com vazamentos na junta de cabeçote o motor não apresentou falhas de ignição. Na Tabela 4 pode-se observar que houve alterações na pressão de compressão para ambos os ensaios, sendo encontradas pressões superiores a de montagem para os ensaios com óleo vegetal e, no caso do E-1, ainda foi subestimada devido aos vazamentos na junta. Observou-se que esta maior pressão ocorreu devido à carbonização excessiva da câmara de combustão nos E-1 e E-2. Já para o E-2, após as 50 h de funcionamento, não ocorreram condições especiais de funcionamento (queima da junta), embora também tenha sido constatado o aumento da pressão de compressão.

Tabela 4 - Pressão de compressão da câmara de combustão para os três ensaios.

| Ponto da avaliação | E-1 (kgf cm ⁻²) | E-2 (kgf cm ⁻²) | E-3 (kgf cm ⁻²) |
|--------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Zero horas | 15,0 | 15,0 | 15,0 |
| 50 horas | 16,0 | 15,8 | 13,0 |

Como comentado, outro problema encontrado foi a carbonização excessiva para E-1 e E-2, quando comparado com o E-3, como mostra a Tabela 5. Segundo Porte (2008) a carbonização excessiva pode ser explicada pela maior viscosidade do óleo vegetal, que interfere na atomização do combustível na câmara de combustão.

Tabela 5 - Comparação entre a carbonização ocorrida nos componentes avaliados do motor para os ensaios E-1, E-2 e E-3.

| Componente avaliado | Carbonização E-1 ¹ (g) | Carbonização E-2 ² (g) | Carbonização E-3 ³ (g) | Razão E-1 E-3 ⁻¹ | Razão E-1 E-2 ⁻¹ | Razão E-2 E-3 ⁻¹ |
|---------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Bico injetor | 1,064 | 0,197 | 0,136 | 0,872 | 0,815 | 0,058 |
| Câmara de combustão | 7,945 | 7,582 | 3,508 | 0,558 | 0,046 | 0,513 |
| Sistema de admissão | 2,281 | 1,102 | 0,316 | 0,696 | 0,334 | 0,362 |
| Sistema de escape | 17,697 | 11,783 | 5,375 | 0,861 | 0,517 | 0,344 |

1 – Ensaio com óleo vegetal sem pré-aquecimento; 2 – Ensaio com óleo vegetal pré-aquecido; 3 – Ensaio com petrodiesel

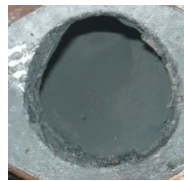
De acordo com a Tabela 5, pode-se observar que o ensaio utilizando óleo pré-aquecido (E-2) mostrou-se melhor que o E-1 com relação a carbonização, porém em comparação com

o E-3, ainda se mostra elevado. Segundo Ryan III et al. (1984), a formação de depósitos, principalmente no bico injetor, é decorrente da alta viscosidade do óleo, onde combustíveis com alta viscosidade prolongam o fim da injeção e promovem gotejamento após a mesma.

Com relação ao duto e válvula de escape do E-1 encontrou-se o maior acúmulo, justamente porque o combustível é parcialmente queimado, pode ficar aderido nas paredes deste (Figura 2). A análise visual da carbonização dos componentes em E-2 mostrou que o material aderido é mais sólido, rígido e seco, sendo também mais difícil de ser removido, quando comparado com a carbonização do E-1. As duas carbonizações de óleo vegetal são diferentes da formada por petrodiesel, sendo esta mais branda e fácil de ser removida. Observou-se também retorno pela admissão para ambos os ensaios, sendo a do E-1 maior, devido à elevada carbonização e aumento de pressão de compressão.



2a. Duto de escape do E-1



2b. Duto de escape do E-2



2c. Duto de escape do E-3

Figura 2 - Carbonização na válvula e no ducto de escape do cabeçote para E-1 e E-2.

Os resultados da Tabela 6 demonstram que a carbonização ocorrida nos três ensaios (Figura 3) não causou problemas de atomização. Para o caso da pressão de abertura do bico injetor do E-2, foi utilizada a mesma pressão de abertura encontrada no final do E-1 (145 kgf cm^{-2}), por estar dentro do limite aceitável de queda de pressão. Neste, encontrou-se uma queda de 15 kgf cm^{-2} , redução de pressão semelhante a do E-1 com relação a pressão de referência. No E-2 também foi perceptível desgaste no elemento de ponta injetora, o qual pode ter sido decorrente de falta de lubrificação, pelo baixo poder de lubricidade do óleo de girassol ou por prováveis impurezas, como resíduos de fósforo, resíduos metálicos como ferro, sódio e magnésio. Os traços de ferro não foram determinados no óleo utilizado (Tabela 3). Estes últimos, segundo Dorsa (1995) podem existir complexados na forma de lipídios metálicos.

Tabela 6 - Resultados das avaliações do bico injetor para os ensaios E-1, E-2 e E-3.

| Ensaio um (E-1) | Ensaio dois (E-2) | Ensaio três (E-3) |
|--|--------------------------------------|--------------------------------------|
| -----PRESSÃO DE ABERTURA----- | | |
| Aceitável 10% de queda de pressão sobre a referência | | |
| Referência – 160 kgf cm^{-2} | Montagem – 145 kgf cm^{-2} | Montagem – 160 kgf cm^{-2} |
| Montagem – 165 kgf cm^{-2} | 50 h – 130 kgf cm^{-2} | 50 h – 160 kgf cm^{-2} |
| 50 h – 145 kgf cm^{-2} | Aumento de retorno | Aumento de retorno |
| -----ESTANQUIEDADE----- | | |
| 5 s com pressão de 15 a 20 kgf cm^{-2} menor que a pressão de abertura | | |
| Sem vazamento | Sem vazamento | Sem vazamento |
| -----ATOMIZAÇÃO----- | | |
| Avaliação visual do grau de atomização | | |
| Alta pressão – normal | Alta pressão – normal | Alta pressão – normal |
| Baixa pressão – normal | Baixa pressão – deficiente | Baixa pressão – deficiente |

No caso do E-3, a pressão de abertura foi reajustada para a pressão de referência e não

se constatou alteração nesta, havendo porém desgaste acentuado da ponta e do corpo do elemento, ocasionada pela utilização de petrodiesel de má qualidade. Estes resultados são visualizados pelo aumento da vazão de retorno e pulverização deficiente em baixas pressões.



3a. Bico injetor do E-1

3b. Bico injetor do E-2

3c. Bico injetor E-3

Figura 3 - Carbonização do bico injetor após 50 h para E-1, E-2 e E-3.

Constatou-se no E-2 e E-3 problemas com atomização a baixas pressões de injeção, o qual causa problemas quando o motor estiver funcionando sobre muita carga. Neste caso não acontece uma mistura adequada de ar e combustível, ocorrendo queima inadequada. Contudo, durante os ensaios com óleo vegetal, o motor praticamente não funcionou com esta quantidade de carga. Outro problema encontrado no E-2 foi o aumento da vazão no retorno do bico, indicando que realmente houve desgaste. A Tabela 7 mostra os resultados das avaliações da bomba injetora para os três ensaios, onde somente foi perceptível desgaste na hélice do elemento de bomba para os ensaios E-2 e E-3, porém, segundo fabricante, os elementos da bomba injetora são peças mais duráveis, por não exigirem precisão nas medidas e superfícies, como acontece com o bico injetor, podendo a primeira durar até três vezes mais.

Os problemas de atomização deficiente do combustível causaram elevada carbonização, a qual resultou em aumento da pressão de compressão, favorecendo o vazamento de pressão e produtos da queima para o cárter do motor (*blow-by*), entre outros problemas como o travamento parcial ou “*scuffing*” do primeiro anel de compressão na canelada do êmbolo (neste caso existem 3 anéis de compressão), observado no E-1 e E-2, por acúmulo de produtos resultantes da queima irregular do combustível. A queima inadequada do combustível causa perda de potência, a qual tende a ser suprida com a entrada de uma quantidade maior do mesmo, como foi constatado no consumo (Tabela 8).

Tabela 7 - Avaliações na bomba injetora para os ensaios E-1, E-2 e E-3.

| Ensaio um (E-1) | Ensaio dois (E-2) | Ensaio tres (E-3) |
|------------------------------|-------------------|-------------------|
| -----INJEÇÃO----- | | |
| Acoplado ao bico injetor | | |
| Normal | Normal | Normal |
| -----DESGASTE DA HÉLICE----- | | |
| Avaliação visual | | |
| Não perceptível | Perceptível | Perceptível |

O aumento de consumo (Tabela 8) neste trabalho, em relação ao petrodiesel, foi inferior ao consumo encontrado por Maziero et al. (2007) para óleo de girassol (9,3% maior), por Pimentel & Belchior (2002), para óleo de dendê pré-aquecido a 85°C (10% maior) e Soares et al. (2000), para óleo de dendê pré-aquecido a 55°C (15% maior), mostrando que o aquecimento do combustível pode ter influenciado na redução do consumo.

Tabela 8 - Consumo horário de combustível e relativo ao petrodiesel para E-1 E-2 e E-3.

| Combustível | Consumo (L h ⁻¹) | Diferença em relação ao petrodiesel (%) |
|-------------|------------------------------|---|
| E-1 | 0,916 | +2,3 |
| E-2 | 0,901 | +0,7 |
| E-3 | 0,896 | - |

A contaminação do óleo lubrificante também foi observada para os ensaios E-1 e E-2, porém foi mais visível no E-1, na forma de montantes aglutinados com viscosidade muito elevada, a qual pode causar até obstrução de canais. A Tabela 9 se refere a análise de viscosidade para o óleo lubrificante novo, e a Tabela 10, para o óleo usado, sendo que na comparação, observou-se uma redução na viscosidade, podendo ser devido a contaminação por produtos do combustível. De acordo com Porte (2008), a contaminação do óleo lubrificante por produtos advindos do combustível causa uma perda do poder de lubrificidade.

Tabela 9 - Viscosidade e densidade para o óleo lubrificante no tempo zero para os ensaios E-1 e E-2.

| Parâmetros avaliados | E-1 | E-2 |
|--|-------|-------|
| Viscosidade a 40°C (mm ² s ⁻¹ ou cSt) | 82,80 | 83,45 |
| Viscosidade a 100°C (mm ² s ⁻¹ ou cSt) | 10,96 | 11,12 |

Na Tabela 10 pode-se observar que a aparência e cor do óleo para os ensaios E-1 e E-2, são bem diferentes, com relação a precipitação de óleo degradado com alta viscosidade, é evidenciado pela análise físico-química que indica sólidos em depósito e em suspensão. Os sólidos em suspensão no E-1 podem ser da contaminação com óleo vegetal combustível, ou produtos de pirólise e oxidação incompleta. Em geral, segundo Snook (1968) e Asseff (1975), os óleos lubrificantes possuem aditivos que dispersam, neutralizam e diluem contaminantes do combustível, para que estes não alterem as propriedades do lubrificante, porém, estes são específicos para petrodiesel. Outro fator é o poder tampão dos aditivos, o qual pode ter sido ultrapassado pela quantidade do contaminante.

Tabela 10 - Parâmetros de qualidade avaliados para o óleo lubrificante no tempo cinquenta horas para os ensaios E-1 e E-2.

| Parâmetro | E-1 | E-2 |
|---------------------------|-----------------------------------|-----------------|
| Aparência | Sólido em depósito e em suspensão | Normal |
| Cor | Castanho escuro | Preto |
| Viscosidade a 40°C (cSt) | 71,1 | 72,1 |
| Viscosidade a 100°C (cSt) | 9,9 | Nd ¹ |
| Teor de água (%) | 0,05 | Nd |
| Ponto de fulgor (°C) | 190 | Nd |
| Oxidação (A/0,1mm) | 0,44 | 0,51 |
| Nitratação (A/0,1mm) | 0,07 | 0,12 |
| Sulfatação (A/0,1mm) | 1,3 | 1,46 |
| Fuligem (A/0,1mm) | 0,01 | 0,14 |

Nd - não determinado

Para o caso da cor, esta é muito influenciada pela quantidade de fuligem diluída no lubrificante, por isso o caso do E-2 (0,14), indicou a cor preta em relação ao E-1 (0,01) (Tabela 10). Segundo Snook (1968), com relação aos teores de água, estes somente começam

a ser problemáticos quando ultrapassam 0,1%, o que não ocorreu. Com relação as variações de viscosidade para proceder a troca do lubrificante, existem várias sugestões. Alguns autores sugerem a troca quando houver alteração de 1° SAE para mais ou para menos, (25 a 35%) (SNOOK, 1968), outros sugerem limites bem menores (5 e 10%) (ESSO, 1970), porém, segundo Asseff (1975), esses valores são difíceis de serem estimados, pois são dependentes de muitos fatores, como o tipo do motor, qualidade do óleo lubrificante, tipo de trabalho realizado, ambiente de trabalho, e ainda, segundo Esso (1970), se o óleo é multiviscoso ou monoviscoso. Para este experimento, onde foi utilizado um lubrificante monoviscoso, para viscosidade do óleo a 40°C, encontrou-se redução semelhantes de 14,1 e 13,6% para E-1 e E-2 respectivamente. Para a viscosidade do lubrificante usado a 100°C do E-1, houve uma redução inferior a 10%, quando comparado com o tempo zero. Para o caso dos índices de sulfatação, nitratação e oxidação, não foram encontradas referências indicando limites, mas o fato do E-2 apresentar valores maiores para os três casos, pode-se dizer que o E-2 pode ter sido mais rigoroso, mesmo quando desempenhado o mesmo trabalho a campo.

Na Tabela 11, entre os elementos avaliados para o óleo lubrificante, os mais preocupantes são os teores de ferro, estanho, cobre e alumínio o qual se apresentam elevados para E-1 e E-2. Segundo Snook (1968), Asseff (1975) e Esso (1970), os elementos ferro, estanho e cobre são advindos do desgaste do motor, e parte do conteúdo de alumínio pode ser advindo de contaminação por impurezas do ar de admissão. Como comentado anteriormente, o E-2 apresentou níveis maiores de contaminação, devido basicamente às condições de trabalho que foram mais severas, principalmente com relação a admissão de material suspenso no ar, onde ao final das 50 h, o filtro de ar teve que ser substituído.

Tabela 11 - Elementos avaliados para o óleo lubrificante no tempo 50 h nos ensaios E-1 e E-2.

| Elementos avaliados (mg kg ⁻¹) | E-1 | E-2 | Limites de traços de elementos em óleos de cárter | | | Origem do contaminante |
|---|------|------|---|---------------|-------------|------------------------|
| | | | Snook (1968) | Asseff (1975) | ESSO (1970) | |
| Cálcio (Ca) | 1567 | 1648 | - | - | - | C ¹ |
| Magnésio (Mg) | 0 | 17 | - | - | - | C |
| Fósforo (P) | 490 | 502 | - | - | - | C |
| Boro (B) | 2 | 6 | 20 | - | 10 | C, A ² |
| Potássio (K) | 0 | 31 | 50 | - | - | C, A |
| Sódio (Na) | 2 | 8 | - | - | - | C, A |
| Silício (Si) | 23 | 37 | 20 | 16,2 | 25 | Ar ³ |
| Cromo (Cr) | 3 | 15 | 40 | 6,4 | 25 | M, A |
| Chumbo (Pb) | 88 | 95 | 100 | - | 200 | M, C |
| Alumínio (Al) | 20 | 70 | 40 | 17,3 | 10 | M, Ar |
| Molibdênio (Mo) | 36 | 45 | - | - | - | M ⁴ |
| Zinco (Zn) | 532 | 600 | - | - | 10 | M |
| Cobre (Cu) | 26 | 58 | 40 | 19,2 | 60 | M |
| Ferro (Fe) | 286 | 565 | 100 | 69,5 | 200 | M |
| Estanho (Sn) | 8 | 9 | - | 1,0 | - | M |
| Titânio (Ti) | 1 | 2 | - | - | - | M |

¹advindo do combustível; ²advindo da água de arrefecimento; ³advindo de impurezas do ar de admissão; ⁴advindo de desgaste do motor.

Exemplo das condições comentadas para E-2 são os teores de silício, o qual apresentou-se 60,8% maior que E-1, o qual é advindo da poeira (solo) admitido com o ar atmosférico. Estas partículas podem atuar como abrasivo, causando desgaste dos componentes móveis. Para os demais elementos, não se pode atribuir somente a contaminação a partir do óleo vegetal combustível, pois segundo Sági et al. (2008), elementos como enxofre, cálcio, fósforo, zinco e molibdênio, podem fazer parte da composição de aditivos do lubrificante. Porém, como existe diferença na quantidade dos mesmos entre os ensaios, pode-se dizer que existe influência da contaminação por combustível, principalmente com relação aos elementos fósforo, sódio, potássio, cálcio e magnésio, os quais foram identificados na análise do óleo vegetal combustível. Destes elementos citados como provável procedência do óleo combustível, dois chamam a atenção, o potássio e o magnésio, estando ausentes na análise do E-1 e presentes no E-2. Com isso, pode-se dizer que estes dois metais alcalinos são provenientes do combustível, acreditando-se que isso ocorreu devido a melhor queima do combustível, o qual pode ter-los mineralizado na câmara de combustão, favorecendo a passagem destes para o cárter. Outro ponto é que o motor, em seu projeto original, não possui filtro de lubrificante, permitindo que impurezas como resíduos metálicos do desgaste de ajuste das partes móveis fiquem circulando no motor, prejudicando-o.

4. CONCLUSÕES

Conclui-se que os problemas encontrados no motor foram inferiores aos problemas indicados pela literatura, com o óleo de girassol como combustível para os dois ensaios. O ensaio com pré-aquecimento foi melhor que o com o ensaio sem aquecimento. Houve contaminação do lubrificante por óleo vegetal combustível para os dois casos; para o caso do E-2 houve também contaminação por potássio e magnésio advindos do combustível. Ainda não se pode recomendar a utilização do óleo de girassol com as especificações de extração e processamento realizado, pois o número de horas de funcionamento foi pequeno perto do número de horas que um motor pode funcionar com petrodiesel.

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro ao desenvolvimento do trabalho. Ao Centro de Ensino Superior dos Campos Gerais (CESCAGE), a Retificadora de Máquinas (Retimaq), a Retificadora de Sistemas de Injeção Diesel (ALDISA), ao Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI) e ao Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR), onde sem a colaboração e apoio destes, o presente estudo não teria sido concluído com o mesmo êxito.

REFERÊNCIAS

- ASSEFF, P.A. The lubizol corporation ESSO: Analisis de aceite usaso - SU significado. **Instituto Americano del Petróleo Chicago**, Illinois, v. 16, 1975.
- BETTIS, B.L. et al. Fuel characteristics of vegetable oil from oilseed crops in the Pacific Northwest. **Agronomy Journal**, v. 74, n. 2, p. 335-339, 1982.
- BRASIL. ANP, **Portaria ANP N. 80 de 30.04.99**, Anexo 1: Regulamento técnico ANP N. 3/99. 1999.

BOBBIO, P.A.; BOBBIO, F.O. **Introdução a química de alimentos**. Campinas, Fundação Cargill, p. 306, 1985.

CASTRO, C. et al. Boro e estresse hídrico na produção de girassol. **Ciência Agrotécnica**, Lavras, v. 30, n. 2, p. 214-220, mar./abr., 2006.

DORSA, R. **Tecnologia de processamento de óleos e gorduras vegetais e derivados**. Coletânea para treinamento interno da Westfalia Separator, para técnicos de engenharia de alimentos. Escola de engenharia de Mauá, São Caetano do Sul, SP., p. 185, 1995.

DUNN, R.O. Outros combustíveis diesel alternativos derivados de óleos vegetais. In: KNOTHE, G. et al. **Manual de Biodiesel**. Tradução (CEPESQ/UFPR). São Paulo: Edgard Blücher, cap.10, p. 269-293, 2006.

ENGLER, C.R. et al. Effects of processing and chemical characteristics of plant oils on performance of an indirect-injection diesel engine. **JAOCs**, v. 60, n. 8, p. 1592-1596, 1983.

ESSO. Boletim de informações técnicas: Limites de uso; Avaliação dos óleos de cárter. **ESSO Brasileira de petróleo S.A**, v. 1, p. 42, 1970.

HANCSÓK, J. et al. Production of vegetable oil fatty acid methyl esters from used frying oil by combined acid/alkali transesterification. **Petroleum & Coal**, v. 46, n. 3, p. 36-44, 2004.

INOUE, G.H. et al. Variação da viscosidade cinemática de óleos vegetais bruto em função da temperatura. IN: II Congresso Brasileiro de Plantas Oleaginosas, Óleos, Gorduras e Biodiesel, **Anais...** Varginha – MG 2005.

KNOTHE, G. A história dos combustíveis derivados de oleos vegetais. In: KNOTHE, G. et al. **Manual de Biodiesel**. Tradução (CEPESQ/UFPR). São Paulo: Edgard Blücher, cap.4, p. 5-18, 2006.

MARCOS FILHO, J. **Fisiologia de sementes de plantas cultivadas**. Piracicaba: Fealq, p. 495, 2005.

MAZIERO, J.V.G. et al. Desempenho de um motor diesel com óleo bruto de girassol. **R. Bras. Agrocência**, Pelotas, v. 13, n. 2, p. 249-255, 2007.

PETCU, E. et al. The effect of drought stress on fatty acid composition in some Romanian sunflower hybrids. **Romanian Agricultural Research**, n. 15, p. 39-43, 2001.

PETERSON, C.L. et al. Vegetable oil substitutes for diesel fuel. **Transactions of the ASAE**, v. 26, n. 2, p. 322-327, 1983.

PIMENTEL, V.S.B.; BELCHIOR, C.R.P. Análise e Diagnose de Diesel Geradores Operando com Óleo de Dendê in Natura. In: Agrener 2002 Energia no Meio Rural, 2002, Campinas - SP. **Anais...** Agrener 2002, Energia no Meio Rural, 2002.

PORTE, F.A. Biodiesel de girassol em microtratores monocilíndricos: emissões, consumo específico e conseqüências de seu uso para o motor. **Dissertação** (Mestrado). UNISC, 2008.

RYAN III, T.W. et al. The effects of vegetable oil properties on injection and combustion in

two different diesel engines. **JAOCS**, v. 61, n. 10, p. 1610-1619, 1984.

SÁGI, R. et al. Elemental analysis of engine oils using energy dispersive x-ray fluorescence spectroscopy (EDXRFS) and inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy (ICP-AES). **Petroleum & Coal**, v. 50, n. 1, p. 1-10, 2008.

SNOOK, W.A. Uma publicação técnica dedicada a escolha e uso de lubrificantes: Análises de óleos usados de motores. **Texaco Brasil S.A. Lubrificação**, SP., v. 54, n. 9, 1968.

SOARES, G.F.W. et al. Operação de um grupo gerador diesel utilizando óleo vegetal bruto como combustível. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 3. **Proceedings...** Campinas – SP. 2000.

WENDT, V. et al. Produção de girassol em dois sistemas de semeadura em função da adubação verde de inverno associada a doses de NPK. **Acta Scientia Agronomica**, Maringá, v. 27, n. 4, p. 617-621, 2005.