

## **MATERIAIS PARTICULADOS PM<sub>2,5</sub>, PM<sub>10</sub> E NANOMÉTRICOS, ORIGINADOS NAS EMISSÕES DE UM MOTOR DIESEL**

Daniel Mousinho Lago<sup>1</sup> (Lago, D.M.)

Fábio César Miranda de Oliveira (Oliveira, F.C.M.)

Eugênio Teixeira de Carvalho Filho (Carvalho Filho, E.T.)

Manoel Fernandes de Oliveira Filho (Oliveira Filho, M.F.)

João Telésforo Nóbrega de Medeiros (Medeiros, J.T.N.)

### **RESUMO**

*Materiais particulados PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub> e nanopartículas emitidas por motores diesel têm sido crescentemente motivo de endurecimento da legislação ambiental nas grandes metrópoles em todo o mundo. A norma EURO 6, vigente na Europa e PROCONVE P7, no Brasil, regulamentam as emissões de tais PM, causadores de danos à saúde humana, comprometendo os sistemas humanos respiratório e circulatório. Este trabalho investigou o material particulado emitido por um motor do ciclo diesel, trabalhando com dois tipos de biodiesel: B6 e B6 aditivado em laboratório. Utilizou-se uma bancada dinamométrica acoplada a um motor diesel e o material particulado foi coletado utilizando um método em processo de patenteamento que consiste de uma cápsula acoplada ao duto de exaustão com um elemento retentor de partículas. As coletas foram feitas a cada 20 horas dentro de um total de 140 horas de funcionamento para cada combustível. Posteriormente, realizou-se uma análise morfológica das partículas. Para isso, análises através de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e microanálise química por espectroscopia por energia dispersiva de raio-x (EDS) do material coletado identificaram a morfologia e a natureza química dos PM, que é discutida, constatando-se bastonetes, partículas esferoidais e lamelas. A partir do material particulado emitido, foi possível identificar diferentes mecanismos e regimes de desgaste atuantes no motor. Para o B6 aditivado, o tamanho das partículas foi maior bem como apresentou indícios de desgaste mais severo.*

*Palavras chave: Material particulado, meio ambiente, motor diesel*

## INTRODUÇÃO

Motores diesel (MD) são a fonte de energia de diversos equipamentos nos setores de mineralogia, agricultura, construção civil e, principalmente, no setor de transportes. Em todo o mundo seu uso crescente deve-se a durabilidade, boa eficiência e baixo custo<sup>(1)</sup>. Diante do cenário apresentado, os MDs tornaram-se um iminente problema pois contribuem significativamente para a poluição do meio ambiente<sup>(1,2,3)</sup>. Dentre as suas principais emissões estão o material particulado (MP) e o NOx, em menor quantidade estão monóxido de carbono, hidrocarbonetos não queimados e enxofre<sup>(1)</sup>. O MP é indesejável pois diminui a visibilidade, altera quimicamente a composição atmosférica e causa diversos problemas respiratórios nos seres humanos<sup>(4)</sup>.

As partículas mais danosas ao meio ambiente e à saúde humana presentes no MP são as de menor diâmetro aerodinâmico, essas são classificadas em PM10 e PM2,5, partículas com diâmetro inferior a 10 µm e 2,5 µm, respectivamente. Partículas nessa distribuição de diâmetro permanecem por mais tempo em suspensão na atmosfera, o que aumenta a probabilidade de inalação e a taxa com que a composição do ar é alterada<sup>(4)</sup>.

Em resposta a essa situação diversas diretrizes vem sido tomadas na tentativa de amenizar o problema. No Brasil o Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE) é o responsável por limitar os níveis de emissão veicular. O propósito é reduzir o nível de emissão induzindo o desenvolvimento tecnológico em combustíveis, motores e autopeças.

No setor de combustíveis, o biodiesel vem apresentando importantes resultados no controle da emissão do MP, a Agência Nacional de Petróleo (ANP) tem colocado em vigor resoluções que determinam o teor de enxofre, atualmente limitado em 10 ppm (S10), e determinam a adição do biodiesel no diesel, atualmente em 7% (B7). Com isso, conseguiu-se uma melhora no nível de emissões dos motores diesel, porém a resposta tribológica dos seus componentes não é a mesma de quando se tinha um diesel mineral com elevado teor de enxofre<sup>(5)</sup>. Houve redução na lubrificidade do diesel, e componentes como o bico injetor ficam sujeitos a um desgaste mais severo<sup>(6)</sup>.

Nesse sentido, tem-se procurado alternativas para melhorar o desempenho do motor e reduzir a emissão de material particulado. Entre elas, encontra-se a rota que propõe modificações no combustível, que geralmente apresenta soluções mais baratas do que modificações em componentes do motor, que envolve componentes de elevado valor<sup>(7)</sup>.

A emulsão de água no diesel é uma alternativa que garante uma menor temperatura adiabática de chama na câmara de combustão, assim reduzindo a formação NO<sub>x</sub>, além de promover a queima do material particulado formado durante o processo de combustão devido à presença de elementos oxidantes reativos como o OH<sup>(7)</sup>.

Dessa maneira, o objetivo desse estudo é apresentar informações à respeito do MP proveniente de um MD operando com B6 e outro com B6 com água emulsionada, caracterizando sua morfologia, tamanho de partículas e mecanismos de desgaste envolvidos na formação de *debris* presentes no MP.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Os ensaios foram realizados em um motor do ciclo diesel quatro tempos, um cilindro, estacionário com injeção direta de combustível do modelo Branco BD-5.0, 5 hp. O motor funcionou acoplado a um dinamômetro com carga constante de 333 W e uma rotação de  $2600 \pm 100$  cpm, tais valores de carga e rotação foram escolhidos por serem os mais comuns no trânsito urbano brasileiro. A Figura 1 mostra de maneira esquemática a bancada de ensaios utilizada.

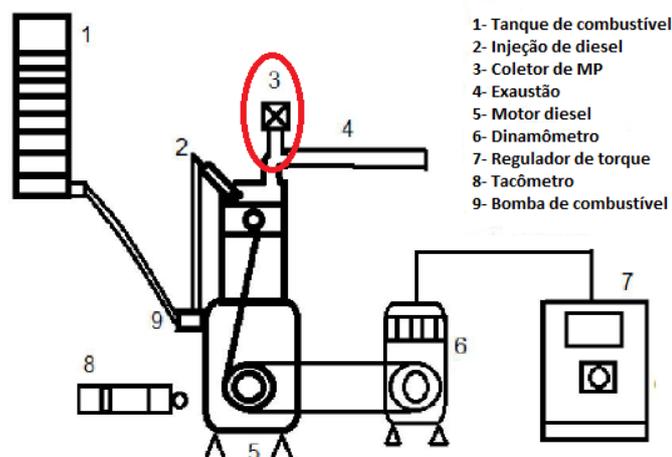


Figura 1 – Representação esquemática da bancada dinâmométrica.

Para a captura do MP foi desenvolvido um dispositivo de captura de partículas, elemento 3 da Figura 1. O equipamento consiste em uma cápsula acoplada ao escapamento do motor em sua região de curvatura, o mais próximo possível da exaustão da câmara de combustão. Um elemento têxtil foi inserido na cápsula com o propósito de reter a maior parte do MP (Figura 2) e, posteriormente, levado para análises de MEV e EDS.

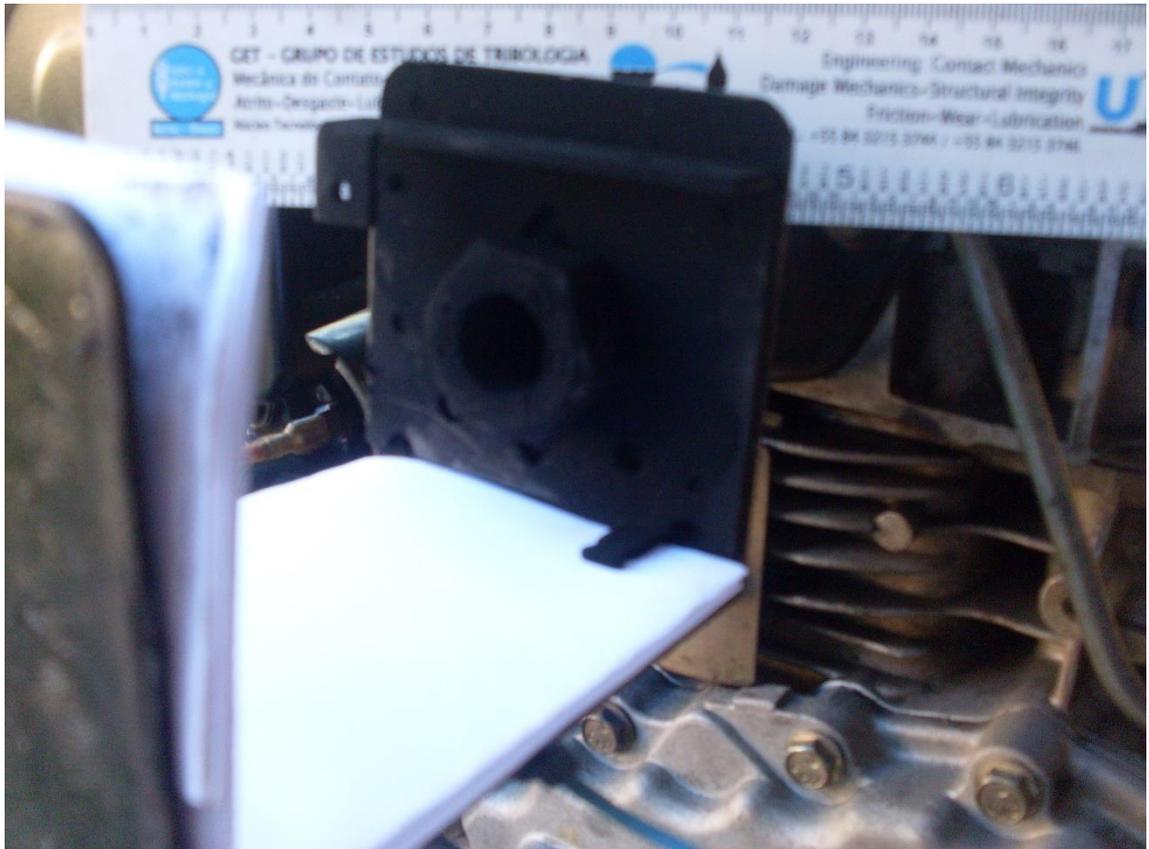


Figura 2 – Sistema de coleta de material particulado emitido pelo motor.

O elemento têxtil funciona como filtro do MP, dessa forma, uma parcela das partículas ficam aderidas em sua superfície enquanto o restante passa pelos seus orifícios. O comprimento médio dos orifícios no elemento têxtil é de 4,20  $\mu\text{m}$  com geometria elíptica (Figura 3).



Figura 3 – Orifícios do elemento têxtil retentor de material particulado.

Com o objetivo de relacionar a produção e emissão de MP com a taxa e os mecanismos de desgaste atuantes na câmara de combustão a coleta do elemento têxtil foi realizada na fase de *running-in* do motor, 20 horas de ensaio, essa fase apresenta elevada taxa de desgaste devido aos contatos não conformes entre as superfícies em movimento relativo, conseqüentemente, há uma maior presença de *debris* no MP<sup>(8)</sup>. Foram feitos dois ensaios: a amostra A foi coletada em um motor que operou com diesel S10 adicionado de 6% de biodiesel, já na amostra B utilizou-se diesel S10 adicionado de 6% de biodiesel e água emulsionada com tensor ativo.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

As imagens obtidas por MEV mostram a tendência das partículas a formar aglomerados em ambos os ensaios (Figura 4). Os elementos mais comuns nas duas amostras são o ferro, alumínio e o silício, comprovando a relação entre desgaste e produção de *debris* no MP (Figura 5).

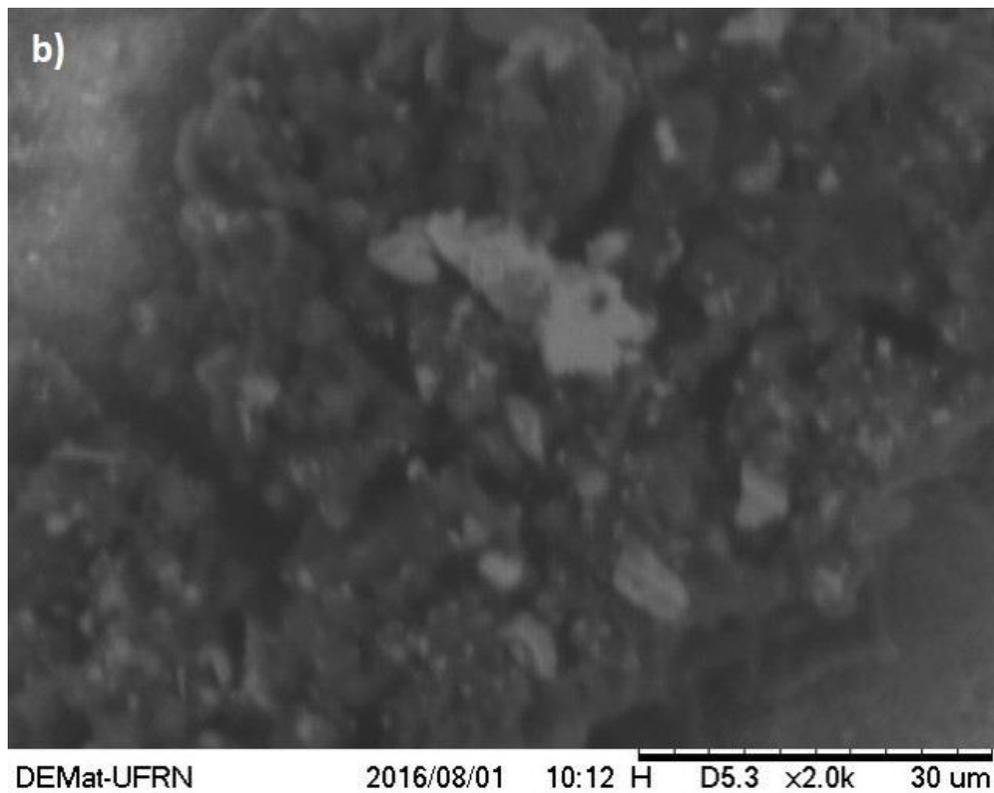
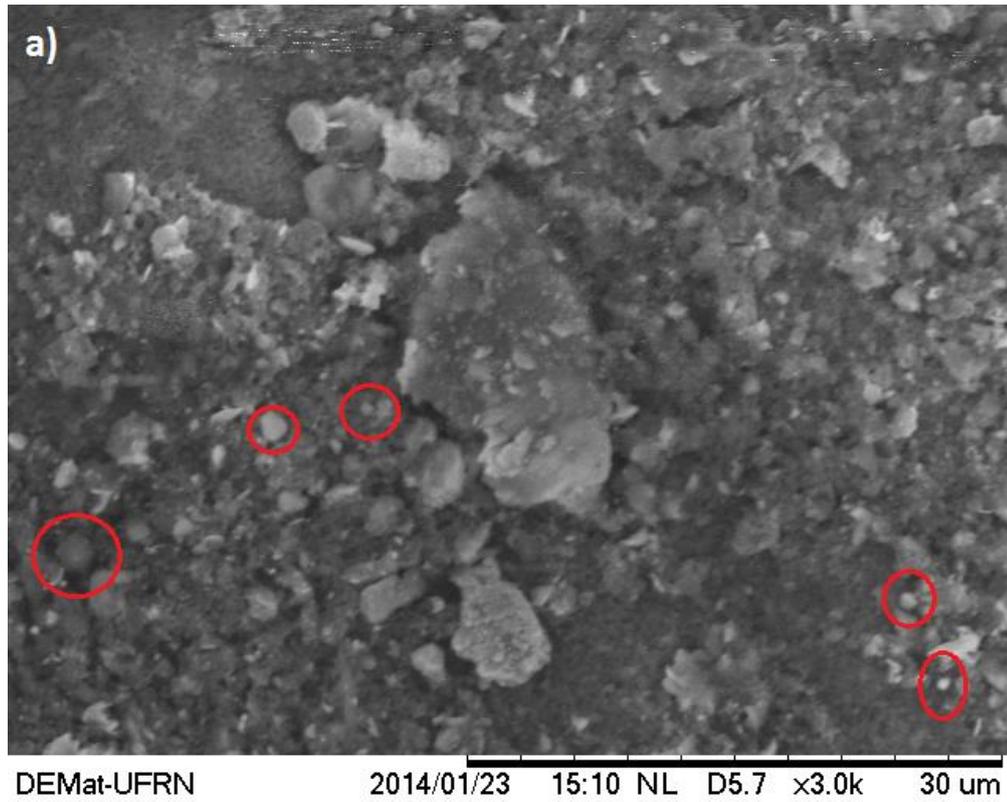


Figura 4 – Material particulado oriundo da combustão do combustível (a) B6 (b) B6 aditivado.

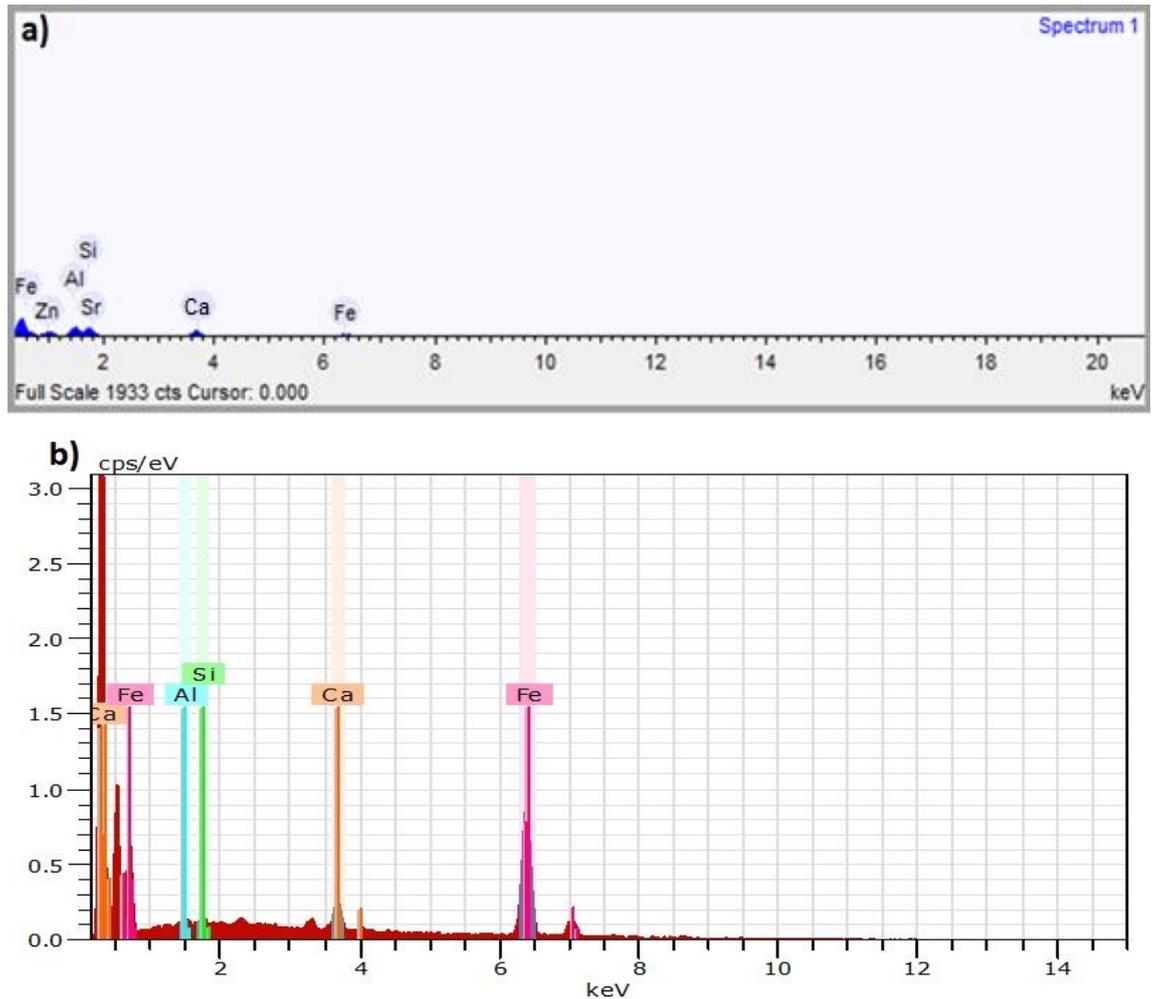


Figura 5 – EDS referente às micrografias (a) figura 4a (b) figura 4b.

É possível verificar que a amostra A, Figura 4a, apresenta maior quantidade de MP dispostos de maneira mais heterogênea. Na região ao centro da Figura 4a há um *debrri* do tipo *chunk*<sup>(9)</sup> com aproximadamente 20 um de comprimento. Esse *debrri* é característico de um mecanismo de desgaste do tipo *spalling*, no qual o dano inicia-se na subsuperfície do material e propaga-se à medida que o número de ciclos aumenta até haver o completo desprendimento do *debrri*. Em menor tamanho, há a presença de *debris* esféricos, destacados em vermelho, o que indica a ação de um processo cavitativo<sup>(10)</sup> e/ou de altas temperaturas na câmara de combustão<sup>(9)</sup>.

Como a análise de EDS, Figura 5, mostra a presença preponderante de metais como alumínio e ferro em ambas amostras, os *debris* esféricos, destacados na amostra A, Figura 5a, provavelmente foram formados por flutuações pontuais de temperatura da ordem de 1100 °C, ou seja, a temperatura mínima de fusão para uma liga ferro-carbono, o que é compatível

com a temperatura adiabática de chama do diesel, que é na ordem de 2000 °C<sup>(11)</sup>. Esse fator também pode justificar a gênese das partículas esféricas.

Na amostra B, Figura 4b, as partículas estão dispostas de maneira menos heterogênea. A diferença de tonalidades entre as partículas e a superfície a qual elas estão aderidas é um indicativo da possível ação de desgaste adesivo. A Figura 6, obtida pelo mapeamento por EDS da amostra B, revela que trata-se de partículas de ferro aderidas em uma superfície de alumínio e silício. O ferro é proveniente de componentes como cilindro, bico injetor e escapamento, enquanto a liga de alumínio e silício está presente na cabeça do pistão. Para consolidar a hipótese de desgaste adesivo é necessário uma investigação na superfície dos componentes da câmara de combustão e escapamento, o que será exposto em outro estudo. É possível verificar a presença de trincas na superfície de alumínio e silício, esse comportamento está associado ao processo de fragilização da liga após a formação de óxidos<sup>(12)</sup>. Os *debris* de ferro são do tipo *rubbing*, bordas irregulares com superfície lisa, essas partículas são originadas de tensões cisalhantes elevadas da superfície do material<sup>(9)</sup>.

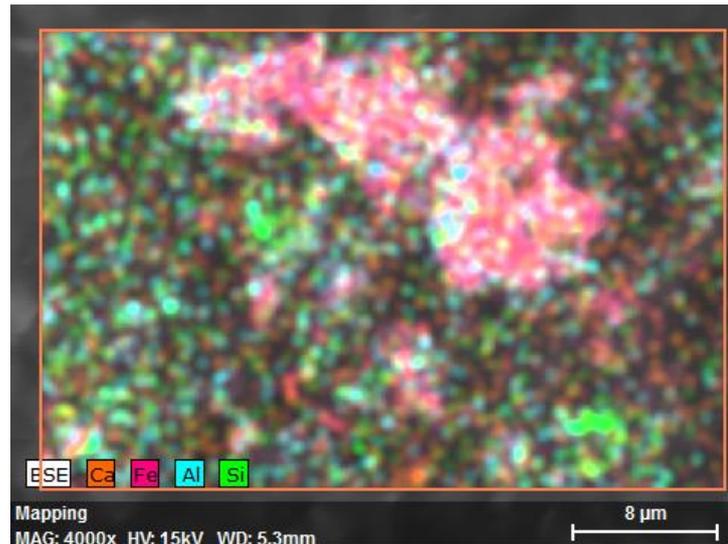


Figura 6 – Mapeamento por EDS da Amostra B.

A Figura 7a mostra *debris* encontrados na amostra A, a seta vermelha destaca um *debr*i no formato *platelet*, bordas regulares e superfície lisa, indicando comportamento frágil<sup>(12)</sup>. Essa partícula é oriunda do processo de delaminação, que se inicia devido às elevadas variações de temperatura na câmara de combustão e conseqüente formação de trincas térmicas, que ao se

propagarem, causam o dano<sup>(12)</sup>. Abaixo desse *debri*, há a presença de um *debri chunk*. A Figura 7b apresenta a distribuição de *platelets* em outra região da amostra A.

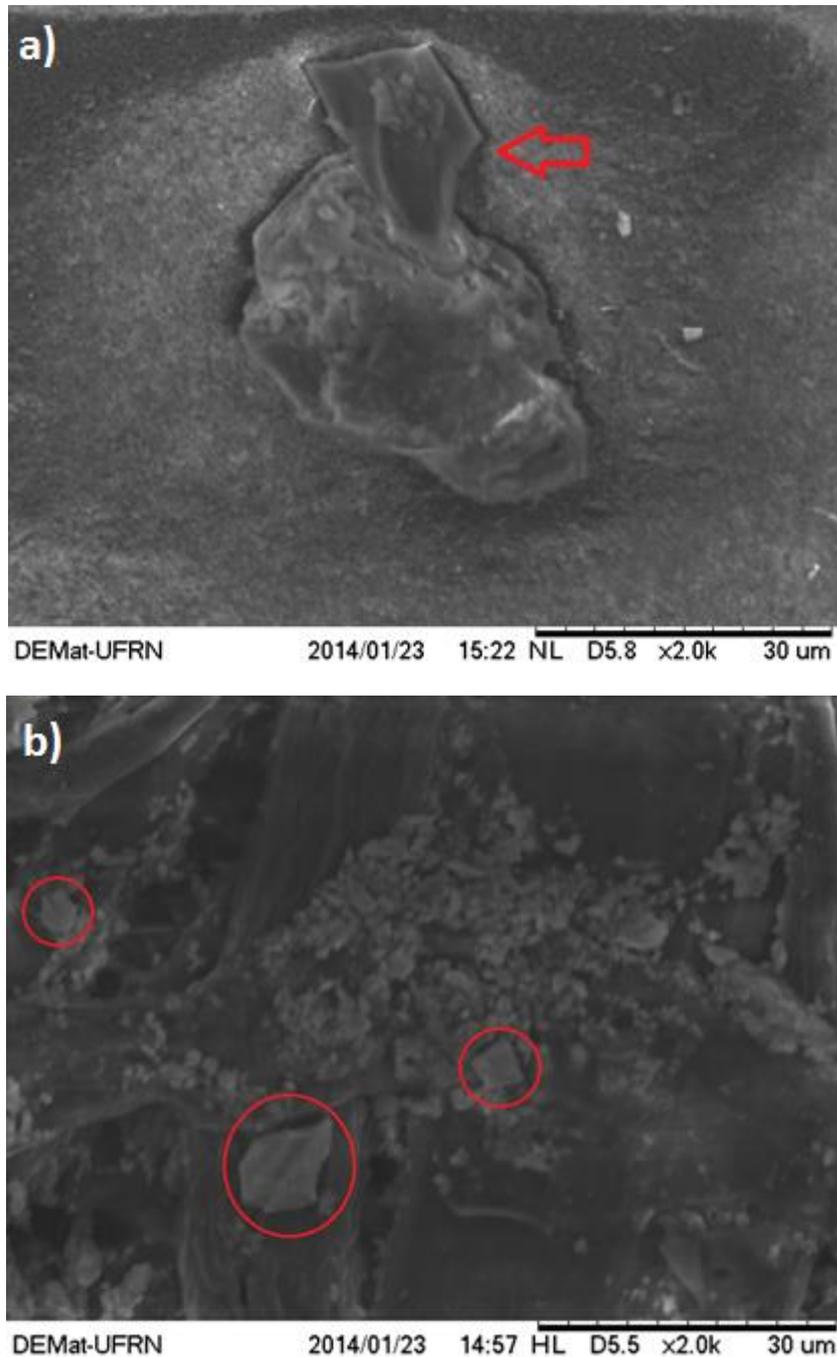


Figura 7 – *Debris* do tipo *platelet* encontrados na Amostra A.

Os demais *debris* encontrados na amostra A apresentaram características de fratura frágil, devido a presença de trincas e morfologia coerente com mecanismo de desgaste do tipo *spalling*. Esses *debris* são

maiores na amostra A, chegando a quase 70  $\mu\text{m}$ , e possuem material aderido em sua superfície.

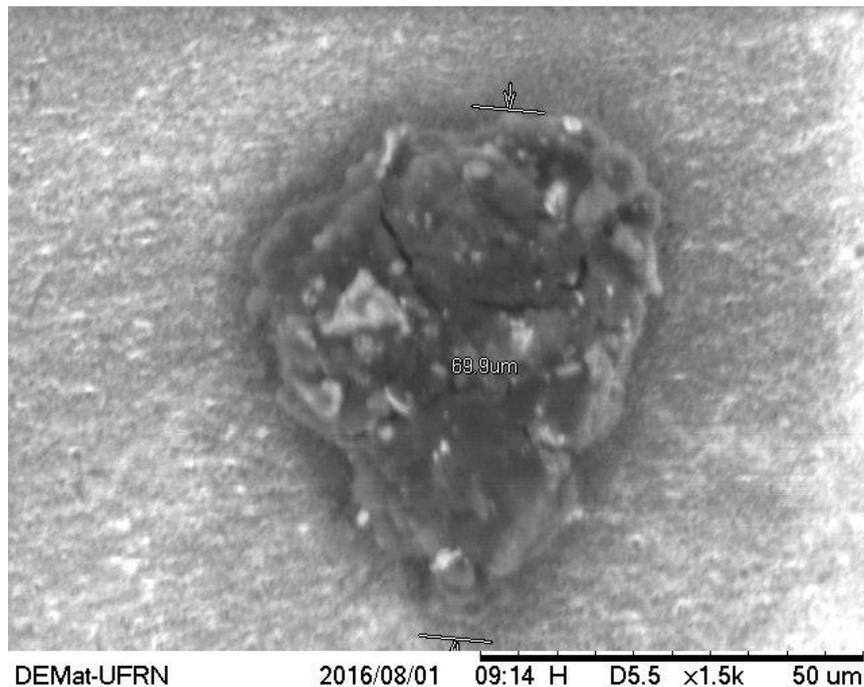


Figura 8 – *Debris* com morfologia característica do mecanismo de desgaste *spalling*.

## CONCLUSÕES

Através das análises de MEV e EDS foi possível comparar o tamanho, a origem e mecanismo envolvidos na formação do MP para dois diferentes combustíveis em um motor do ciclo diesel. Dessa forma, esse estudo apresenta o combustível mais adequado em termos de quantidade de MP produzido e desgaste na câmara de combustão.

A literatura mostra que a emulsão de água no biodiesel é responsável pela diminuição da temperatura adiabática de chama e consequente picos de temperatura na câmara de combustão. Foi verificado que o motor funcionando com esse combustível produziu menos particulado e *plattlets*. Essas características indicam que a redução da temperatura adiabática de chama no combustível diminuiu a quantidade de trincas térmicas e o desgaste por delaminação. Em contrapartida, a interação entre as superfícies dos pares tribológicos do motor foi alterada, o que resultou em maior desgaste adesivo com partículas de até 20  $\mu\text{m}$ . Esse comportamento pode ter ocorrido devido a

forças de campo e/ou alteração na atmosfera na câmara de combustão, para resultados mais precisos é necessário a realização de análises mais detalhadas.

No motor funcionando apenas com B6, os debrís evidenciam elevada taxa de delaminação decorrente de trincas térmicas. Os debrís encontrados são em sua maioria pertencentes ao PM10 e ao PM2,5, partículas mais danosas ao meio ambiente e à saúde humana. Diante dos dados apresentados, o B6 aditivado com tensoativo e água mostrou-se mais adequado por produzir uma menor taxa de produção de partículas danosas e apresentar menor desgaste por delaminação.

## REFERÊNCIAS

- (1) PRASAD, R. and BELLA, V. R. A Review on Diesel Soot Emission, its Effect and Control. *Bull. Chem. React. Eng. Catal.*, vol. 5, no. 2, pp. 69–86, 2011.
- (2) LIATI, A.; EGGENSCHWILER, P. D.; GUBLER, E. M., SCHREIBER, D.; AGUIRRE, M. Investigation of diesel ash particulate matter: A scanning electron microscope and transmission electron microscope study. *Atmos. Environ.*, vol. 49, pp. 391–402, 2012.
- (3) SINGH, J. and CHAUHAN, A. A Review on Sliding Wear Behaviour of Aluminium Matrix Composites with Hybrid Reinforcements for Automotive Applications. *Tribol. Online*, vol. 3, pp. 121–134, 2014.
- (4) KITTELSON, D. B. Engines and nanoparticles: A review. *J. Aerosol Sci.*, vol. 29, no. 5–6, pp. 575–588, 1998.
- (5) FARIAS, A. C. M.; MEDEIROS, J. T. N.; ALVES, S. M. Micro and Nanometric Wear Evaluation of Metal Discs Used on Determination of Biodiesel Fuel Lubricity. *Materials Research*. Brazil, p. 89-99. 9 jun. 2014.
- (6) SILVA, L. C. Avaliação do desgaste triboquímico de agulhas dos bicos injetores em motores diesel operando com biodiesel. Dissertação de Mestrado. UFRN, PPGEM, 2015. 123p.
- (7) CHIOSA, A.; SCARPETE, D.; BUTURCA, R. an Overview on Combustion and Performance Characteristics of Diesel Engine Using Diesel-Water Emulsion. v. di, 2013.
- (8) OLIVEIRA, F. C. M.; LAGO, D. M.; MOREIRA FILHO, A. A. C.; MEDEIROS, J. T. N.; OLIVEIRA FILHO, M. F. Lognormal analysis of diesel exhaust from a

low cost method to grip particles. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, Fortaleza, CE, 2016.

(9) KUMAR, M.; MUKHERJEE, P. S.; MISRA, N. M. Advancement and current status of wear debris analysis for machine condition monitoring: a review. *Ind. Lubr. Tribol.*, vol. 65, no. 1, pp. 3–11, 2013.

(10) OLIVEIRA FILHO, Manoel Fernandes de. Efeito do Biodiesel no Bico Injetor e na Emissão de Material Particulado em Motor do Ciclo Diesel. 2016. 200 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

(11) GLAUDE, Pierre Alexandre et al. Gas Turbines and Biodiesel : a Clarification of the Relative NOx Indices of Fame, Gasoil and Natural Gas. 2009. Disponível em: <<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00390700/document>>. Acesso em: 12 set. 2016.

(12) LIMA, E. C. C. Atlas da evolução do desgaste do cabeçote, pistão e pino: Análise do ciclo de vida de um motor de combustão interna. Natal: Edufrn, 2013. 140 p.