

## **Corrosão de materiais metálicos em diferentes misturas diesel:biodiesel**

Cristie Luis Kugelmeier<sup>a</sup>, Rodrigo da Silva<sup>a</sup>, Marcos Roberto Monteiro<sup>b</sup>,  
Sebastião Elias Kuri<sup>c</sup>, Carlos Alberto Della Rovere<sup>c</sup>

### **Resumo**

O uso de biodiesel em veículos pode reduzir significativamente a dependência de combustíveis fósseis e ajudar a reduzir a poluição ambiental, porém, ligas de metais ferrosos e não ferrosos que entram em contato com o biodiesel ou misturas com diesel podem exibir um comportamento corrosivo. Este trabalho avaliou o comportamento à corrosão do aço carbono SAE 8620 (AC), aço inoxidável supermartensítico 13 Cr (AISM), liga de alumínio AA6061-T4 e cobre em três misturas binárias diesel/biodiesel (B7, B15 e B30). Os testes de perda de massa foram realizados por ensaios de imersão total e corrosão por frestas durante 2160 h a 50 °C. Com os dados de perda de massa foram calculadas as taxas de corrosão e os materiais foram avaliados através de microscopia eletrônica de varredura (SEM) e energia dispersiva de raios-X (EDX). Aço carbono SAE 8620, aço inoxidável supermartensítico 13 Cr e a liga de alumínio AA6061-T4 são materiais mais resistentes em contato com biodiesel e suas misturas com óleo diesel, e podem ser usados, por exemplo, como materiais na construção de tanques de transporte e armazenamento.

**Palavras-chave:** Aço carbono 8620; Aço inoxidável supermartensítico 13 Cr; liga de Alumínio AA6061-T4; Cobre; Misturas diesel/biodiesel; Corrosão

### **Introdução**

Os combustíveis renováveis, como o biodiesel, reduzem a dependência por combustíveis fósseis e também diminuem a poluição ambiental (1). Por serem quimicamente compatíveis, diesel e biodiesel podem ser misturados para obter diferentes misturas, e sua utilização já está em uso no Brasil, que pretende aumentar a porcentagem de biodiesel em combustível diesel de B8 para B10 até março de 2019 e o uso de misturas diesel-biodiesel contendo até 15% de biodiesel (2).

No entanto, dada a sua incompatibilidade com alguns materiais, particularmente metais, o biodiesel tem causado problemas como a corrosão metálica. Em motores diesel (automóveis, caminhões, máquinas pesadas etc.) uma mistura de combustíveis (diesel/biodiesel) entra em contato com diferentes peças do motor, incluindo bomba de combustível, bicos injetores, filtros, linhas de combustível, pistões, anéis de pistão etc. Sabendo-se disso, alguns estudos que analisaram a compatibilidade de materiais metálicos em contato com misturas de combustível indicaram que alguns materiais são particularmente suscetíveis à corrosão (3).

Haseeb et al. (4) realizaram estudo com cobre e bronze em misturas B0, B50 e B100 durante 2640 h à temperatura ambiente, verificando que a taxa de corrosão foi maior para o cobre. Fazal et al. (5, 6) relataram resultados semelhantes em estudos de corrosão de cobre em biodiesel de palma puro até 2880 h à temperatura ambiente. Ambos os estudos revelaram que

<sup>a</sup> Mestre-Doutorando, Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos

<sup>b</sup> Professor Doutor, Química, Universidade Federal de São Carlos

<sup>c</sup> Professor Doutor, Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos

a taxa de corrosão do cobre é maior que a de outros materiais. Geller et al. (7), também avaliaram a corrosão em diferentes metais, relatando que tanto aço carbono quanto aço inoxidável não sofreram qualquer perda de massa durante os testes. Além disso, Haseeb et al. (3) afirmam que estes aços são materiais sugeridos para aplicações envolvendo biodiesel. No entanto, a maioria dos testes descritos na literatura foi realizado com biodiesel de palma (8–10) e apenas alguns estudos utilizaram biodiesel de outras fontes, como soja (11), girassol (12) e colza (13).

Quanto à literatura, esta ainda é escassa com relação a estudos sobre o comportamento de corrosão que o biodiesel, composto de óleo de soja e gordura animal (50% de óleo de soja, 48% de sebo bovino e 2% de gordura de porco), pode causar. Sabendo-se disso, o objetivo deste trabalho foi avaliar a susceptibilidade à corrosão do aço carbono SAE 8620, aço inoxidável supermartensítico de 13 Cr, liga de alumínio AA6061-T4 e cobre em ensaios de imersão total e corrosão por frestas em misturas B7, B15 e B30 por 2160 h a 50 °C.

## Metodologia

Aço carbono (recebido na forma de chapa laminada), aço inoxidável supermartensítico (recebido na forma de lingote, com tratamento térmico de têmpera), liga de alumínio (recebido na forma de barras extrudadas a quente e envelhecidas naturalmente) e cobre (> 99,0%) (na forma de chapa laminada a quente) foram estudados por um período de 2160 horas a 50 °C. A Tabela 1 mostra a composição química nominal dos três principais materiais metálicos. Os combustíveis utilizados foram óleo diesel S10 já contendo 7% de biodiesel, comprado em posto de combustível, e biodiesel fornecido pela empresa BSBIOS Marialva, Paraná - Brasil, composto por um blend de 50% de óleo de soja, 48% de sebo bovino e 2% de gordura suína.

**Tabela 1 – Composição química nominal (% em peso)**

Material	Elementos										
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Ti	Mg	Cu	Al	Fe
AC	0,17	0,10	0,60	0,35	0,35	0,15					
	a	a	a	a	a	a	-	-	-	-	Bal.
	0,23	0,40	0,95	0,75	0,75	0,25					
AIMS	0,02	0,2	0,45	12,5	5,8	2,1	-	-	-	-	Bal.
Alumínio AA6061-T4	-	0,62	0,03	0,05	-	-	0,023	1,01	0,19	Bal.	0,22

Para a realização dos ensaios de imersão, os materiais foram cortados por eletroerosão nas dimensões: 40 mm x 20 mm x 3 mm para aço carbono e aço inoxidável. Para alumínio e cobre, as dimensões foram: 25 mm x 20 mm x 3 mm devido ao pouco material disponível. Posteriormente, os materiais foram lixados mecanicamente até a lixa de granulação 1200 mesh e limpos com acetona. As dimensões dos corpos de prova foram medidas com paquímetro digital e pesados utilizando uma balança de precisão de quatro casas decimais.

Os corpos de prova foram imersos em três diferentes misturas de combustíveis, sendo elas diesel S10 + B7, diesel S10 + B15 e diesel S10 + B30 em ensaios de imersão total e imersão

total com formadores de frestas (corrosão por frestas) realizados em duplicata. Após os ensaios, as amostras foram desengorduradas com acetona em banho de ultrassom e novamente pesadas para calcular a perda de massa de acordo com a Equação (1) (14).

$$\text{Taxa de corrosão } (\mu\text{m/y}) = \frac{8,76 \times 10^7 \cdot w}{D \cdot t \cdot A} \quad (1)$$

onde a taxa de corrosão é expressa em micrômetros por ano ( $\mu\text{m/ano}$ ),  $w$  é a perda de peso (g),  $D$  é a densidade ( $\text{g/cm}^3$ ),  $t$  é o tempo de exposição (h) e  $A$  é a superfície exposta ( $\text{cm}^2$ ).

Modificações microestruturais e alterações na composição química foram investigadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia de energia dispersiva de raios-X (EDS).

## Resultados e discussão

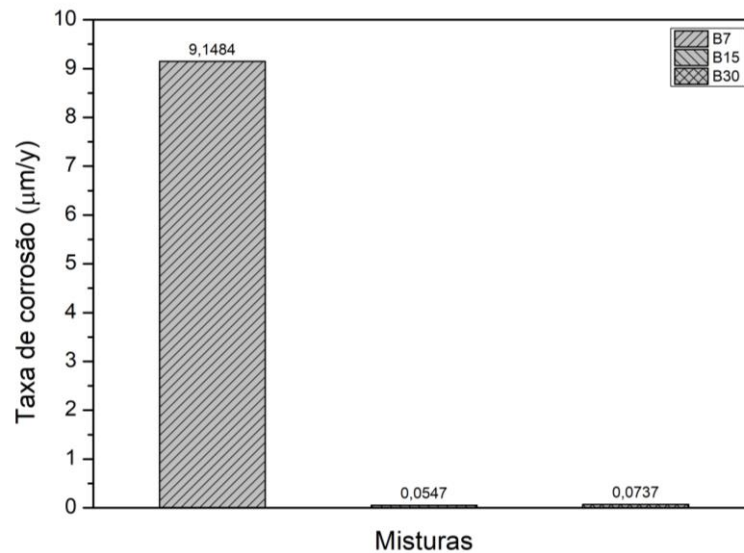
Nos ensaios de imersão total e corrosão por frestas, os materiais aço carbono (AC), aço inoxidável supermartensítico (AISM) e liga de alumínio não apresentaram perdas de massa e taxas de corrosão. Consequentemente, os dados considerados a seguir foram aqueles obtidos para o cobre, que, pelo contato com as misturas de combustíveis, apresentou diferentes taxas de corrosão em função dos testes de imersão. Embora a literatura mostre que o cobre apresenta uma taxa de corrosão relativamente baixa, corroendo a taxas insignificantes em contato com ar não poluído, água e substâncias como ácidos não oxidantes, a taxa de corrosão pode aumentar na presença, por exemplo, de ácidos oxidantes e alguns compostos contendo enxofre (15).

### Ensaio de imersão total

A Figura 1 mostra a taxa de corrosão para o cobre em contato com as três misturas de combustíveis. Verificou-se que o efeito corrosivo foi mais intenso para o cobre em contato com a mistura B7, sendo consideravelmente inferior nas demais concentrações de biodiesel e as taxas de corrosão obtidas em duplicata mostraram que os resultados foram consistentes. Alguns estudos da literatura realizaram ensaios de imersão total com biodiesel de palma puro (B100) ou em misturas com diesel, verificando aumento nas taxas de corrosão com a maior concentração de biodiesel. Nestes estudos foi utilizado o biodiesel de palma, que contém composição próxima de 50% de ácidos graxos saturados e 50% de ácidos insaturados (8, 16, 17).

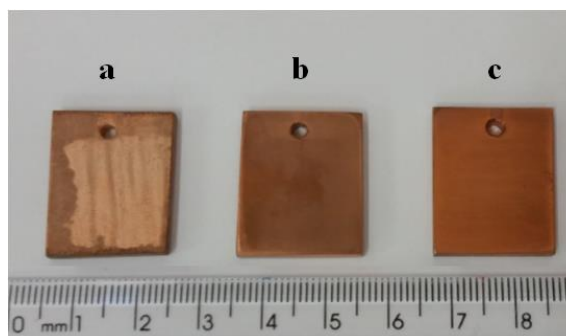
De acordo com Fazal et al. (10), que utilizaram biodiesel de palma, o cobre quando em contato com biodiesel ou em misturas com diesel tende a ser mais susceptível à corrosão, podendo agir como um forte catalisador, ocasionando a oxidação destes combustíveis. Além disso, o biodiesel em contato com o cobre absorve mais água da atmosfera conforme o período de exposição aumenta, favorecendo a hidrólise de ésteres alquílicos, podendo agir diretamente sobre a corrosão dos materiais, levando à formação de produtos com características corrosivas, como ácidos carboxílicos, deteriorando as propriedades do combustível.

No entanto, para este presente estudo, o biodiesel utilizado era constituído de uma mistura com 50% de óleo de soja, 48% de sebo bovino e 2% de gordura suína, além do biodiesel B7 já misturado ao diesel, sendo a sua composição um dos fatores que influenciou nos resultados obtidos.



**Figura 1 – Taxa de corrosão para o cobre em ensaio de imersão total.**

A Figura 2 mostra a aparência dos corpos de prova após a exposição nas misturas de combustíveis. No corpo de prova da Figura 2 (a) houve a formação de uma película de coloração esverdeada que, segundo Fazal et al. (18), ocorre pelo resultado da formação de produtos de corrosão através da conversão de compostos de cobre na superfície do material, podendo haver o aumento da espessura do produto de corrosão de acordo com os tempos de imersão. Para os demais corpos de prova em contato com as misturas B15 e B30, não houve a formação de película.



**Figura 2. Imagem dos corpos de prova de cobre após ensaio de imersão total nas misturas (a) B7, (b) B15 e (c) B30.**

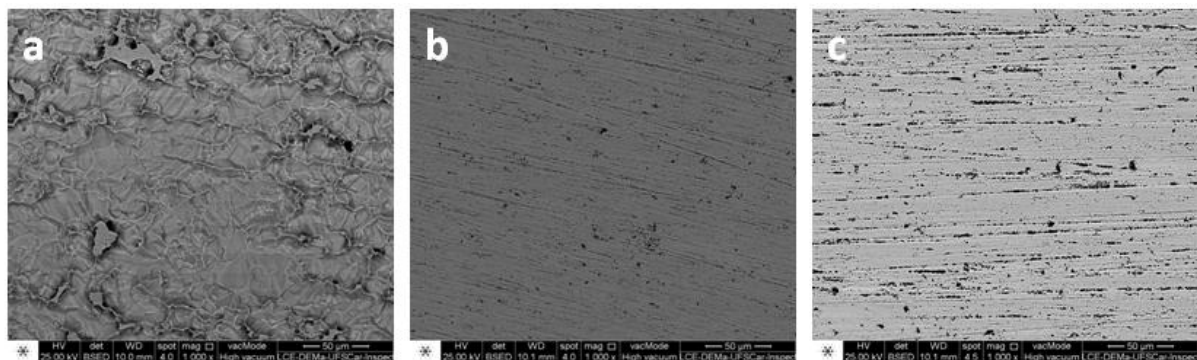
O efeito corrosivo mais intenso na mistura B7 pode estar relacionado com a solubilidade do oxigênio em hidrocarbonetos (60 a 70 ppm), sendo maior do que em fase aquosa (8 ppm) e depende da temperatura, pressão e tipo de combustível. O teor maior de oxigênio e a possível

presença de compostos ácidos na mistura, provenientes da reação de oxidação do biodiesel podem ter tornado o cobre mais susceptível à corrosão (19). Com o aumento no percentual de biodiesel, houve a redução no percentual de diesel que, conseqüentemente, ocasionou menor ataque ao material, mesmo que em contato com o cobre o biodiesel absorva mais água da atmosfera conforme o tempo de exposição (10).

Os produtos de corrosão formados na superfície do cobre podem apresentar diferentes colorações e podem estar relacionados com  $\text{Cu}(\text{OH})_2 \cdot \text{CuCO}_3$  (pátina), a qual possui coloração verde; e  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  (sulfato de cobre pentahidratado), com coloração azul/verde, tendo possíveis causas a presença de  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}_2$  e  $\text{SO}_4$  nas misturas (15). De acordo com Hernandez et al. (20), a presença de água dissolvida,  $\text{CO}_2$  e  $\text{RCOO}^-$  (ânion carboxilato), por exemplo, em meio contendo biodiesel causa a formação de compostos à base de cobre como carbonatos e hidróxidos, cujas reações são descritas por Fazal et al. (18). No entanto, mais estudos devem ser realizados para entender o efeito individual dessas substâncias que levam à formação de alguns compostos de cobre.

A formação de compostos agressivos aos metais pode ocorrer quando uma determinada quantidade de hidrocarbonetos insaturados (olefinas) presentes no diesel, hidrocarbonetos aromáticos e alcadienos em alguns combustíveis, os quais são mais facilmente oxidados pelo oxigênio molecular em temperatura ambiente. Esse processo, chamado de auto-oxidação, que envolve compostos orgânicos, leva à formação de hidroperóxidos ( $\text{ROOH}$ ) e por ser mais reativo do que o oxigênio, devido às ligações O-O, ocorre a formação de radicais ativos e agressivos para alguns metais. O resultado da interação de radicais com os metais leva ao surgimento de compostos orgânicos contendo oxigênio, tais como alcoóis, cetonas, aldeídos e ácidos carboxílicos (19).

A Figura 3 mostra as micrografias de MEV para o cobre em contato com as misturas (a) B7, (b) B15 e (c) B30. Observa-se que o contato do cobre em B7 causou severa corrosão no material, diminuindo de intensidade para as demais misturas. Os resultados indicaram que não apenas o biodiesel pode ser o responsável pela corrosão do cobre, mas também o contato com diesel.



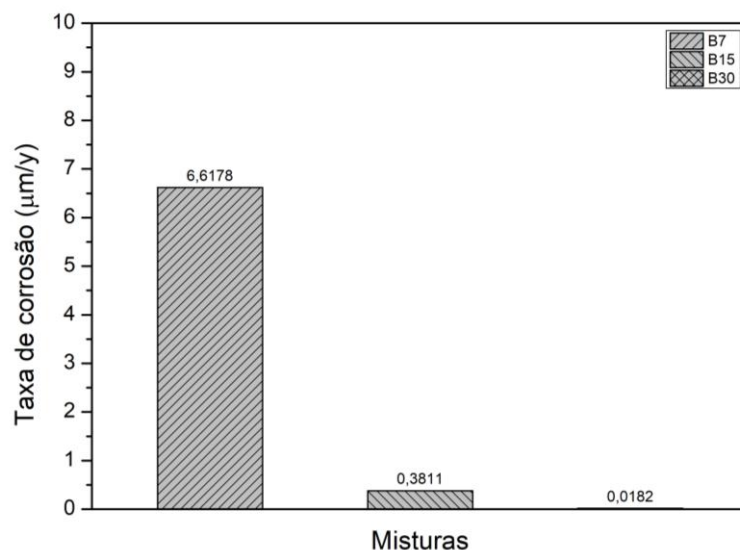
**Figura 3 – MEV do aspecto superficial dos corpos de prova de cobre em contato com as misturas B7 (a), B15 (b) e B30 (c) em ensaio de imersão total.**

A análise elementar realizada por EDS na superfície do cobre antes da exposição às misturas apenas mostrou a presença de cobre. Após a exposição, a análise revelou a presença de produtos de corrosão contendo principalmente C e O. A presença destes elementos indica que

mesmo após procedimento de limpeza, compostos oxigenados ainda estavam presentes no material. As concentrações de C e O foram comparativamente maiores para B7 em contato com cobre quando comparado com as demais misturas. A presença destes elementos no cobre em mistura B7 (Figura 3 (a)), correspondeu a 16,02 e 3,70% (peso), respectivamente. Para o cobre nas misturas B15 e B30 (Figura 3 (b) e (c)), os percentuais foram de 4,86 e 1,87%; e 1,99 e 1,58% (peso), respectivamente. Para aço carbono, aço inoxidável e liga de alumínio nenhuma alteração superficial foi encontrada.

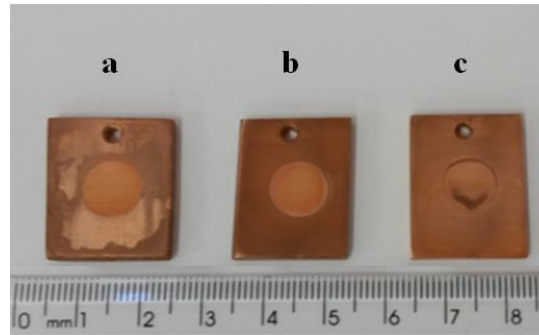
### Ensaio de corrosão por frestas

A Figura 4 mostra a taxa de corrosão para o cobre no ensaio de corrosão por frestas. Referente a este ensaio de corrosão a literatura ainda carece de estudos. Comparando-se o ensaio de corrosão por frestas com o ensaio de imersão total notou-se que o maior efeito corrosivo também ocorreu para o cobre na mistura B7. Foi observado que houve um aumento da taxa de corrosão na mistura B15, fato este que pode estar relacionado tanto com a reatividade do material, quanto à mistura de combustíveis ter apresentado condições que favorecessem o ataque corrosivo, como a formação de produtos ácidos mencionados anteriormente.



**Figura 4 – Taxa de corrosão para cobre em imersão por corrosão por frestas nas misturas B7, B15 e B30.**

A Figura 5 mostra os corpos de prova de cobre que estiveram em contato com as três misturas de combustíveis. Conforme pode-se notar, relacionando a taxa de corrosão com o aspecto físico dos materiais, note que é possível verificar que o ataque corrosivo foi maior para os corpos de prova na ordem B7 > B15 > B30.

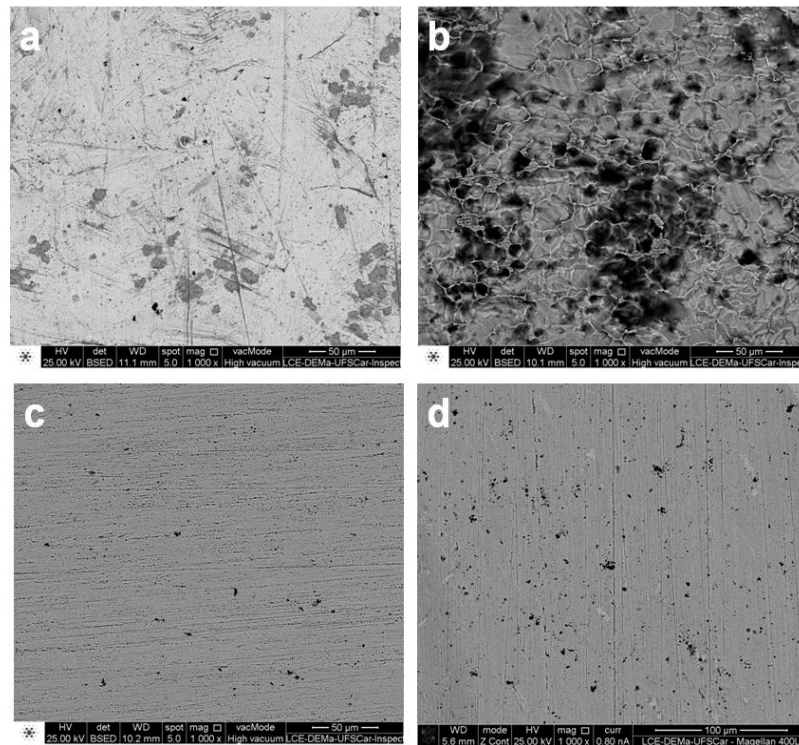


**Figura 5 – Imagem dos corpos de prova de cobre após ensaio de corrosão por frestas nas misturas (a) B7, (b) B15 e (c) B30.**

Conforme a Figura 6 (a), observa-se que a região de contato com o formador de frestas (disco de Teflon<sup>®</sup>) permaneceu mais protegida do ataque corrosivo, e este comportamento é verificado em cobre e suas ligas, onde a localização do ataque ocorre externamente à região da fresta (21). Outro ponto a ser considerado pode estar relacionado com o fato de a região exposta (maior que a região em contato com o disco) ter atuado como uma região anódica em relação à região em contato com o formador de frestas, fazendo com que a área menor estivesse protegida. Desse modo, a região do corpo de prova que apresentou corrosão estava sem contato com o formador de frestas, principalmente na mistura B7 (Figura 6 (b)), onde a superfície do material foi severamente atacada. Para as misturas B15 e B30, notou-se que o ataque corrosivo foi menos intenso (Figuras 6 (c) e (d)), sendo possível observar a superfície do material pouco alterada.

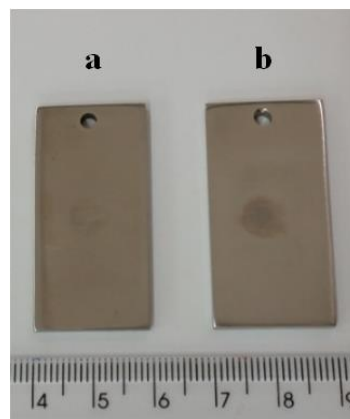
Este resultado mostra que uma maior concentração de biodiesel em misturas com diesel pode não ser a principal causa que leve à corrosão de um material, como mostrado na literatura para o caso do cobre. Outras variáveis podem estar atuando, como a resistência do cobre em contato com diesel, a presença de compostos ácidos oxigenados, a qualidade dos combustíveis, o tempo de contato e a temperatura.

Análise elementar realizada por EDS na superfície exposta das amostras revelou a presença de compostos oxigenados, assim como detectado no ensaio de imersão total, mesmo após procedimento de limpeza do material, sendo um indicativo da ocorrência de corrosão. Na região central (Figura 6 (a)) não foi detectada a presença de oxigênio. O maior percentual obtido foi para o cobre em mistura B7 (Figura 6 (b)) contendo 11,72% de carbono e 2,45% de oxigênio.



**Figura 6 – MEV do aspecto superficial dos corpos de prova de cobre. Região em contato com formador de frestas (a) e região de contato direto com as misturas B7 (b), B15 (c) e B30 em (d).**

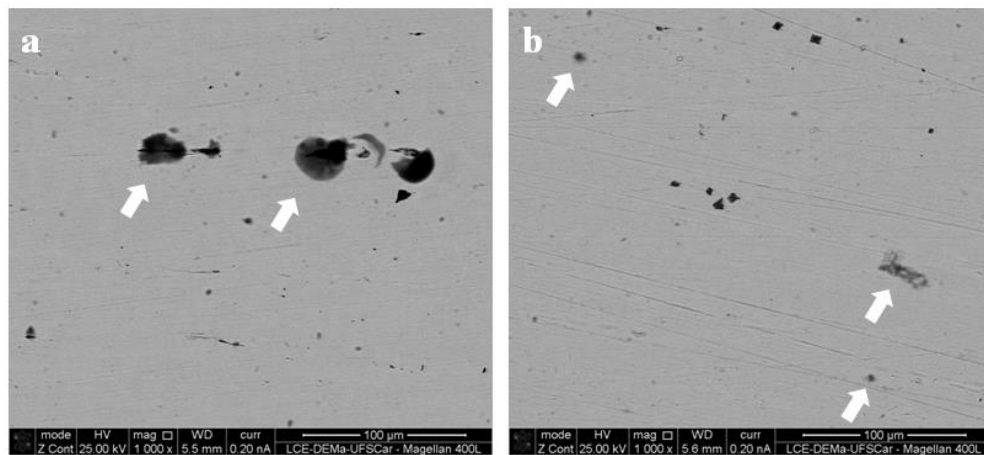
Para aço carbono e aço inoxidável verificou-se que as regiões ao redor do formador de frestas não apresentaram alterações superficiais, como início de corrosão. Porém, no contato com os formadores de frestas foram observadas nos materiais regiões mais escuras, como mostra a Figura 7 (a) para aço carbono e (b) para aço inoxidável.



**Figura 7 – Imagem dos corpos de prova de (a) aço carbono e (b) aço inoxidável após ensaio de corrosão por frestas em contato com mistura B30.**



Pelas micrografias de MEV (Figura 8) observam-se regiões escuras com aspecto, aparentemente, de sinais de oxidação para aço carbono (Figura 8 (a)) e em aço inoxidável (Figura 8 (b)) em contato com a mistura B30, porém, sem que danos fossem causados aos materiais. Como mencionado por Haseeb et al. (3), aço carbono e aço inoxidável são materiais sugeridos para utilização com biodiesel. No entanto, ressalta Singh et al. (16), a resistência destes aços ainda não é muito clara e há divergência nos dados. Análises de EDS mostraram que nos pontos destacados na Figura 9 (a) para aço carbono estavam presentes teores de carbono e oxigênio correspondendo a 35,83 e 4,96% (peso) e (b) para aço inoxidável, 21,88 e 6,61% (peso) respectivamente.



**Figura 8 – MEV do aspecto superficial dos corpos de prova de aço carbono em (a) e aço inoxidável em (b), ambos em contato com misturas B30 no ensaio de corrosão por frestas.**

Quanto à resistência à corrosão do aço inoxidável, o mecanismo de proteção contra corrosão não é o mesmo para a maioria dos outros metais. A proteção do aço inoxidável está relacionada com a formação de um filme passivo de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  sobre sua superfície, a qual é função da espessura da camada de óxido, de sua continuidade, de sua coerência e adesão ao metal. Além disso, a presença de oxigênio é essencial para que este tipo de aço continue sendo resistente à corrosão. Quando o material está em um ambiente com fluxo de massa e sua superfície não é mantida livre de depósitos pode surgir uma região empobrecida em oxigênio, a qual terá característica anódica em relação à região com maior teor de oxigênio, podendo levar ao início de oxidação do material (21).

## Conclusões

- 1) Os resultados obtidos nos ensaios de imersão total e corrosão por frestas mostraram que o efeito causado pelas misturas de combustíveis não necessariamente pode ocasionar corrosão, assim como verificado em estudos da literatura que utilizaram biodiesel de palma e misturas com diesel. A composição do biodiesel, os percentuais de mistura e o tempo de exposição de 2160 horas a 50 °C não causaram danos aos principais materiais metálicos estudados.
- 2) O cobre foi o material que mais apresentou corrosão em contato com combustíveis diesel/biodiesel, assim como verificado na literatura. Tanto o contato direto em

imersão total quanto corrosão por frestas causou ao material considerável dano e elevadas taxas de corrosão, que atua como catalisador de reações de degradação, principalmente do biodiesel, tornando o meio com características corrosivas, mostrando que há incompatibilidade do uso deste material em contato com determinadas misturas de combustíveis.

- 3) O comportamento de corrosão do aço carbono SAE 8620 (AC), aço inoxidável supermartensítico 13 Cr (AISM) e liga de alumínio AA6061-T4 em ensaio de imersão total foi considerado satisfatório, onde nenhum destes materiais apresentou perda de massa e, conseqüentemente, taxa de corrosão nas três misturas avaliadas. No ensaio de corrosão por frestas, aço carbono e aço inoxidável apresentaram pequenas regiões com início de oxidação, porém, sem que houvesse o comprometimento dos mesmos, não sendo registradas taxas de corrosão. Para o alumínio nenhuma alteração foi verificada.
- 4) Os resultados obtidos indicaram que os materiais aço carbono, aço inoxidável e liga de alumínio possuem compatibilidade adequada em contato com misturas binárias diesel/biodiesel nas proporções avaliadas, constituindo-se em alternativas para a fabricação de materiais para o setor automotivo, bem como para o setor de transporte e armazenamento de combustíveis.

### Referências bibliográficas

- (1) Bhattacharya, M., Paramati, S. R., Ozturk, I., Bhattacharya, S. The effect of renewable energy consumption on economic growth: Evidence from top 38 countries. **Applied Energy**, vol. 162, p. 733–741, 2016.
- (2) Boletim mensal dos combustíveis renováveis. Março 2016. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/documents/1138769/1732805/Boletim+DCR+n%C2%20%BA+97+-+mar%C3%A7o+de+2016.pdf/5a4bf34c-4654-4fc7-8ead-751bb5f1641e>>. Acesso em: 10.02.2018.
- (3) Haseeb, A. S. M. A., Fazal, M. A., Jahirul, M. I., Masjuki, H. H. Compatibility of automotive materials in biodiesel: A review, **Fuel**, vol. 90, p. 922–931, 2011.
- (4) Haseeb, A. S. M. A., Masjuki, H. H., Ann, L. J., Fazal, M. A. Corrosion characteristics of copper and leaded bronze in palm biodiesel. **Fuel Processing Technology**, vol. 91, p. 329–334, 2010.
- (5) Fazal, M. A., Haseeb, A. S. M. A., Masjuki, H. H. Corrosion mechanism of copper in palm biodiesel. **Corrosion Science**, vol. 67, p. 50–59, 2013.
- (6) Fazal, M. A., Haseeb, A. S. M. A., Masjuki, H. H. Degradation of automotive materials in palm biodiesel. **Energy**, vol. 40, p. 76–83, 2012.
- (7) Geller, D. P., Adams, T. T., Goodrum, J. W., Pendergrass, J. Storage stability of poultry fat and diesel fuel mixtures: Specific gravity and viscosity. **Fuel**, vol. 87, p. 92–102, 2008.
- (8) Jin, D., Zhou, X., Wu, P., Jiang, L., Ge, H. Corrosion behavior of ASTM 1045 mild steel in palm biodiesel. **Renewable Energy**, vol. 81, p. 457–463, 2015.
- (9) Kannan, S., Saleh, A., Nasir, F. Impact of metals on corrosive behavior of biodiesel e diesel e ethanol (BDE) alternative fuel. **Renewable Energy**, vol. 94, p. 1–9, 2016.
- (10) Fazal, M. A., Jakeria, M. R., Haseeb, A. S. M. A. Effect of copper and mild steel on the stability of palm biodiesel properties: A comparative study. **Industrial Crops and Products**, vol. 58, p. 8–14, 2014.

- 
- (11) Fernandes, D. M., Montes, R. H. O., Almeida, E. S., Nascimento, A. N., Oliveira, P. V., Richter, E. M., Muñoz, R. A. A. Storage stability and corrosive character of stabilised biodiesel exposed to carbon and galvanised steels. **Fuel**, vol. 107, p. 609–614, 2013.
  - (12) Cursaru, D., Branoiu, G., Ramadan, I., Miculescu, F. Degradation of automotive materials upon exposure to sunflower biodiesel. **Industrial Crops and Products**, vol. 54, p. 149–158, 2014.
  - (13) Hu, E., Xu, Y., Hu, X., Pan, L., Jiang, S. Corrosion behaviors of metals in biodiesel from rapeseed oil and methanol. **Renewable Energy**, vol. 37, p. 371–378, 2012.
  - (14) ASTM G1-2011 - Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test, vol. 3, p. 1–9, 2017.
  - (15) A. Groysman. **Corrosion for Everybody**. New York: Springer, 2010. 377 p. ISBN 978-90-481-3476-2.
  - (16) Singh, B., Korstad, J., Sharma, Y. C. A critical review on corrosion of compression ignition (CI) engine parts by biodiesel and biodiesel blends and its inhibition. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 16, p. 3401–3408.
  - (17) Fazal, M. A., Haseeb, A. S. M. A., Masjuki, H. H. Effect of temperature on the corrosion behavior of mild steel upon exposure to palm biodiesel. **Energy**, vol. 36, p. 3328–3334, 2011.
  - (18) Fazal, M. A., Haseeb, A. S. M. A., Masjuki, H. H. Corrosion mechanism of copper in palm biodiesel. **Corrosion Science**, vol. 67, p. 50–59, 2013.
  - (19) A. Groysman. **Corrosion in systems for storage and transportation of petroleum products and biofuels**. New York: Springer, 2014, 306 p. ISBN 978-94-007-7883-2.
  - (20) Hernández, R. P. B., Pászti, Z., Melo, H. G., Aoki, I. V. Chemical characterization and anticorrosion properties of corrosion products formed on pure copper in synthetic rainwater of Rio de Janeiro and São Paulo. **Corrosion Science**, vol. 52, p. 826–837, 2010.
  - (21) ASM - AMERICAN SOCIETY FOR METALS, Volume 13: **Corrosion**, 2003, 3455 p. ISBN: 978-0-87170-705-5.
  - (22) Haseeb, A. S. M. A., Fazal, M. A., Jahirul, M. I., Masjuki, H. H. Compatibility of automotive materials in biodiesel: A review. **Fuel**, vol. 90, p. 922–931, 2011.