

AValiação DA RESISTÊNCIA AO DEsgASTE DOS AÇoS SAE 52100 E SAE 1045 LUBRIFICADOS COM BIODIESEL E ÓLEO DIESEL COMERCIAL*

*Victor Velho de Castro¹
Carlos Alexandre dos Santos²
Joyson Luiz Pacheco³*

Resumo

O presente trabalho tem por objetivo avaliar a resistência ao desgaste de dois diferentes materiais (três amostras de aço SAE 52100 e três amostras de SAE 1045) em diferentes condições microestruturais, sem lubrificação e com lubrificação (utilizando biodiesel B100, óleo diesel/biodiesel B50 e óleo diesel comercial B7). Quatro amostras foram submetidas a tratamento térmico de têmpera (830°C resfriado em óleo nas amostras de aço SAE 52100 e 850°C resfriado em água nas amostras de SAE 1045) seguida de revenimento (100°C e 200°C nas amostras de aço SAE 52100 e 100°C e 300°C nas amostras de SAE 1045). Os ensaios foram realizados em um tribômetro do tipo pino-sobre-disco, com rotação de 300 RPM, 1,5kg de carga e 4400m de distância percorrida, seguindo as recomendações da norma ASTM G99-95, medição da microdureza superficial da pista de desgaste e avaliação da superfície desgastada das amostras com um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). Ao final dos ensaios, observou-se a variação da resistência ao desgaste entre os diferentes materiais, diferentes microestruturas e diferentes lubrificantes aplicados no ensaio. Os resultados indicaram uma tendência de diminuição de desgaste nos ensaios realizados com lubrificação de biodiesel B100.

Palavras-chave: Tribologia; Biodiesel; Pino-sobre-disco; Lubrificante.

EVALUATION OF WEAR RESISTANCE OF SAE 52100 AND SAE 1045 STEELS, LUBRICATED BY PURE BIODIESEL, BIODIESEL-DIESEL BLEND AND COMERCIAL DIESEL OIL

Abstract

The present study aims to evaluate the wear resistance of two different materials (SAE 52100 and SAE 1045 steels) in different microstructure conditions without lubrication and using biodiesel (B100), biodiesel-diesel blend (B50) and commercial diesel fuel (B7). Four samples were subjected to hardening heat treatment of quenching (temperature: 830°C cooled in oil in SAE 52100 steel samples and temperature: 850°C and cooled in water in SAE 1045 samples) followed by tempering (100°C and 200°C in SAE 52100 steel samples to 100°C and 300°C in samples of SAE 1045 steel). It was obtained samples with four different hardness and different microstructure conditions (tempered martensite in steel SAE 1045 and tempered martensite with Chromium Carbide in steel SAE 52100). The experiments will be conducted in a pin-on-disk tribometer, with rotation of 300 RPM, 1,5kg load and 4400 m distance covered, according to the recommendations of ASTM G99-95, followed by the wear track surface hardness measurement and evolution of the samples wear surface with a Scanning Electron Microscope. At the end of the trials, there was a variation of wear resistance between different materials, different microstructures and different lubricants applied in the test. The results showed a tendency to decrease in wear tests with B100 biodiesel lubrication.

Keywords: Tribology; Biodiesel; Pin-on-Disk; Lubricant.

¹ Engenheiro Mecânico, Mestrando em Engenharia e Tecnologia dos Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.

² Engenheiro Mecânico, Doutor em Engenharia Mecânica, Diretor da Faculdade de Engenharia da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.

³ Engenheiro Mecânico, Doutor em Engenharia Metalúrgica, Professor Titular da Faculdade de Engenharia da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.

1. INTRODUÇÃO

O Brasil se encontra na vanguarda na produção e uso de biodiesel, com a criação do Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (PNPB) e aprovação da lei 11097/05, que estabelecia o uso obrigatório de 5% de adição de biodiesel ao diesel a partir do início de 2010. Em setembro de 2014 foi sancionada a adição obrigatória de 7% de biodiesel ao diesel distribuído ao consumidor final, a partir de 1º de novembro de 2014. Atualmente, existe um grande empenho em garantir que os proprietários de veículos não venham a ser prejudicados pelo uso do biodiesel, o que poderia afetar a vida útil de seus veículos.

Tendo em vista o crescente aumento do percentual de biodiesel que o governo federal vem impondo ao diesel fornecido para consumo, as perspectivas de aumento na utilização no futuro, aliado aos diversos e vitais setores da economia brasileira, que são dependentes do óleo diesel como combustível (setor de transporte de carga e passageiros, implementos e máquinas agrícolas, geradores, usuários de automóveis movidos a motores de ciclo diesel, entre outros), a análise da influência que os diferentes percentuais de mistura diesel/biodiesel possam ter na vida útil de equipamentos utilizados pelos consumidores em geral é imprescindível. Assim, justificam-se as análises realizadas com o aço SAE 52100, que é aplicado em grande parte dos elementos de máquina submetidos a desgaste em equipamentos que utilizam óleo diesel como combustível. As análises realizadas com o aço SAE 1045 justificam-se pelo fator comparativo entre os dois diferentes materiais e demonstram a influência que as diferentes misturas de diesel/biodiesel (biodiesel B100, B50 e diesel comercial B7) tiveram em um material não preparado para trabalhar sob condições propícias ao desgaste.

O objetivo deste trabalho é investigar a resistência ao desgaste de amostras de aço SAE 52100 e SAE 1045, com diferentes tratamentos térmicos e conseqüentemente, diferentes durezas e propriedades mecânicas. Foi utilizado o ensaio de desgaste do tipo pino-sobre-disco a seco e lubrificado com biodiesel, óleo diesel comercial B7 e biodiesel B50, seguindo as orientações da norma ASTM G99-95.

2 ENSAIO DE DESGASTE

Desgaste é um termo amplo que engloba vários tipos de falhas, todas envolvendo alterações na superfície da peça. Pode ser definido como um dano progressivo que envolve a perda de material na superfície de um componente, como resultado de um movimento relativo a um componente adjacente. Na maioria das aplicações em engenharia este movimento ocorre na presença de lubrificantes [1].

A Equação de Archard (Equação 1) relaciona a forma e o tamanho da área de contato com o desgaste, o carregamento e a dureza da superfície do material por meio de uma constante k . É normalmente utilizado para modelar o desgaste por adesão e abrasivo [2]

$$Q = k \frac{Fl}{H}, \quad (1)$$

Sendo Q é o volume desgastado do material mais mole [mm^3], F é a força normal [N], l é comprimento de deslizamento [m], H é a dureza a penetração em kg/mm^2 ou psi e k é o coeficiente de desgaste.

O coeficiente de desgaste k provê um importante meio de comparação do rigor dos processos de desgaste em diferentes sistemas tribológicos. Por isso, a equação de Archard fornece importantes parâmetros que descrevem a severidade do desgaste.

No entanto, a sua validade não pode ser usada para determinar a existência ou não de um dos diferentes tipos de mecanismos de remoção de material. Por isso, é necessário o uso de microscópio para identificar os principais mecanismos de desgaste atuantes [3]

Nas análises de desgaste do disco, é considerado o raio da pista de desgaste obtido no ensaio, assumindo que o desgaste do pino é desprezível [4]. A Equação 2 determina a perda de volume do disco:

$$V_{Disco} = 2\pi R \left[r^2 \operatorname{sen}^{-1} \left(\frac{w}{2r} \right) - \frac{w}{4} (4r^2 - w^2)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (2)$$

Onde V é a Perda de volume [mm³], R é o raio da pista de desgaste [mm]; w é a Largura da pista de desgaste [mm] e r é o raio do pino [mm].

O mecanismo de falha conhecido por fadiga superficial é comum em componentes mecânicos como rolamentos. No geral, Fadiga Superficial apresenta defeitos superficiais do tipo microcraterações, que começa a partir do crescimento de trincas geradas pelo mecanismo de desgaste Fadiga Superficial [5].

O desgaste abrasivo ocorre quando duas superfícies de durezas diferentes são colocadas em contato. Assim, a carga mais dura penetra na mais macia, produzindo deformações. A fragilidade do material deve ser analisada, pois, podem ocorrer trincas, e conseqüentemente, um maior desgaste na camada superficial. A proporção do desgaste depende muito de aspectos como tamanho, dureza, pressão de contato e velocidade das partículas [5].

3. MATERIAIS E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1. Confecção dos Corpos de Prova

Seguindo as recomendações da norma ASTM G99-95, o pino esférico com 10 mm de diâmetro é fabricado em Alumina (Al₂O₃). Dispensou-se a preparação superficial da superfície da esfera.

As amostras confeccionadas em formato de discos foram fabricadas pelos processos de torneamento, seguido de retificação superficial, no Laboratório de Processos de Fabricação da Faculdade de Engenharia da PUCRS. Os discos possuem um diâmetro de 115 mm, com 20 mm de espessura inicial.

Os tratamentos térmicos empregados nas amostras estudadas são apresentados na Tabela 1:

Tabela 1. Tratamentos Térmicos Aplicados as Amostras Ensaçadas.

Amostra	1	2	3	4	5	6
Material	Aço SAE 1045			Aço SAE 52100		
Têmpera	Bruto de Laminação	830°C	830°C	Esferoidizado	850°C	850°C
Revenimento	-	100°C	300°C	-	100°C	200°C

Seguindo as recomendações da norma ASTM G99-95, as amostras foram submetidas ao processo de lixamento, sendo aplicadas as seguintes lixas respectivamente: #100, #220, #320, #400, #600, #1200. O processo foi executado nas duas faces das amostras. A composição química nominal das amostras é apresentada na Tabela 2:

Tabela 2. Composição Química Nominal das Amostras

Material	C	Si	Mn	Cr
Aço SAE 52100	0,98 – 1,10	0,15 – 0,35	0,25 – 0,45	1,30 – 1,60
Aço SAE 1045	0,43 – 0,50	0,15 – 0,35	0,60 – 0,90	-

Fonte: Gerdau, 2014.

3.2 Análise de Desgaste

O dispositivo pino-sobre-disco utilizado neste estudo é apresentado na Figura 1. O desgaste é obtido analisando a perda de massa ou a variação das medidas do disco, realizadas antes e depois dos testes. O desgaste é resultado de uma combinação de fatores como força aplicada, velocidade de deslizamento, distância percorrida, lubrificantes e propriedades dos materiais [6].



Figura 1 a) Dispositivo de Desgaste do Tipo Pino-Sobre-Disco Utilizado no Estudo; b) Amostra Desgastada de Aço SAE 52100 Esferoidizado

Os parâmetros dos ensaios, aplicados em todas as condições propostas, são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros Empregados no Ensaio de Desgaste

Velocidade de deslizamento (RPM)	Carga (N)	Distância total percorrida (m)
300	14,71	4400

A largura da pista de desgaste (w) foi analisada a cada 400m de distância percorrida, sendo medidos a cada 90° da pista, totalizando quatro medições. As últimas medições da pista (4400m de distância percorrida) foram realizadas a cada 45°, totalizando oito medições. Ao final do ensaio foi possível traçar o perfil da largura e volume desgastado do disco, bem como o coeficiente de desgaste médio k (obtido através das Equações 1, 2). O processo foi repetido três vezes em cada uma das condições propostas. Assim, foram obtidas 24 medidas da última pista de desgaste, as quais foram utilizadas para obtermos o valor médio da largura da pista de desgaste após 4400m de distância percorrida.

Durante os ensaios lubrificadas, as amostras eram ensaiadas submersas nos diferentes lubrificantes aplicados (Biodiesel B100, Diesel/Biodiesel B50 e Óleo Diesel Comercial B7) que estavam à temperatura ambiente.

3.3. Ensaio de Microdureza

Os ensaios de Microdureza Vickers (mHV), com carga de 200g, foram realizados nos discos desgastados a fim de comparar a variação da dureza da pista de desgaste, antes e depois do ensaio. Os resultados obtidos na pista de desgaste foram comparados com os valores encontrados na superfície não desgastada e aplicados na Equação 3.1 na determinação do coeficiente de desgaste k (convertidos em kg/mm^2 – Dureza Brinell).

3.4. Análise Superficial com Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)

A fim de determinar os mecanismos atuantes no desgaste das amostras nas diferentes condições propostas, foram realizadas análises da condição superficial das pistas desgastadas utilizando microanálises através do MEV.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os gráficos das Figuras 2 e 3 relacionam o comportamento da Largura Média da Pista de Desgaste, encontrada em cada uma das situações propostas ao longo dos 4400m de distância percorrida. Nos ensaios a seco, que avalia a resistência ao desgaste das propriedades intrínsecas do material (coesão intermolecular, microestrutura, presença de fases de alta dureza dentro da estrutura cristalina, entre outros), apresentou o material SAE 52100 esferoidizado com a maior largura da pista de desgaste. Da mesma forma, o material que apresentou a menor Largura da Pista de Desgaste foi o aço SAE 52100, porém, com estrutura martensítica (na amostra temperada e revenida a 100°C), demonstrando a grande influência que a estrutura cristalina e dureza têm na resistência ao desgaste.

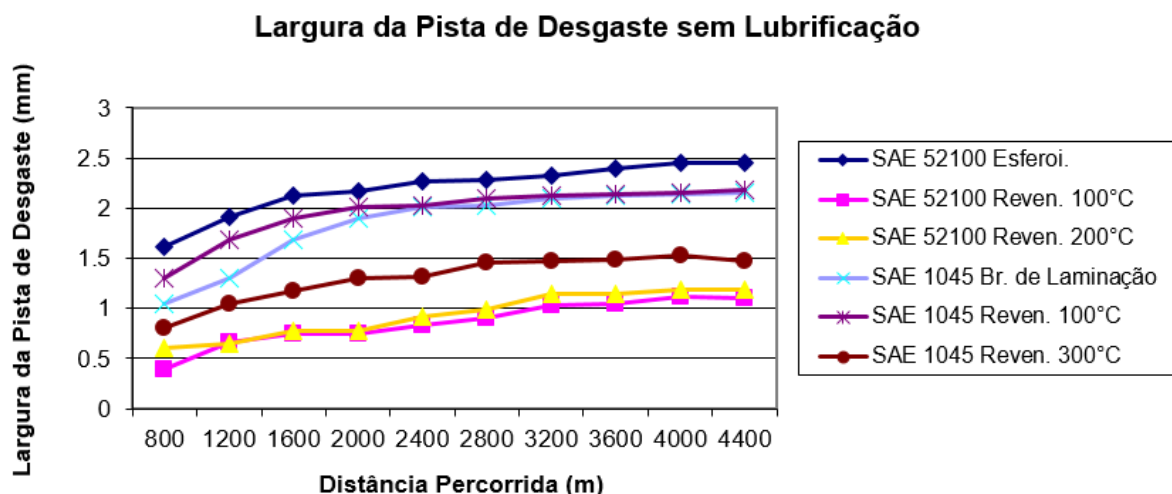


Figura 2. Largura da Pista de Desgaste nos Ensaios com Ausência de Lubrificação

Comparando os resultados encontrados entre os ensaios a seco e lubrificados, destaca-se o aço SAE 52100 esferoidizado, que apresentou uma redução de 55,10% no ensaio lubrificado com biodiesel B100.

Apesar da amostra de aço SAE 1045 na condição bruta de laminação, no ensaio lubrificado com biodiesel B100 ter apresentado a maior largura da pista de desgaste, os resultados encontrados nas amostras temperadas e revenidas de ambos os aços

analisados demonstram a tendência de diminuição da largura da pista de desgaste nas análises lubrificadas com biodiesel puro.

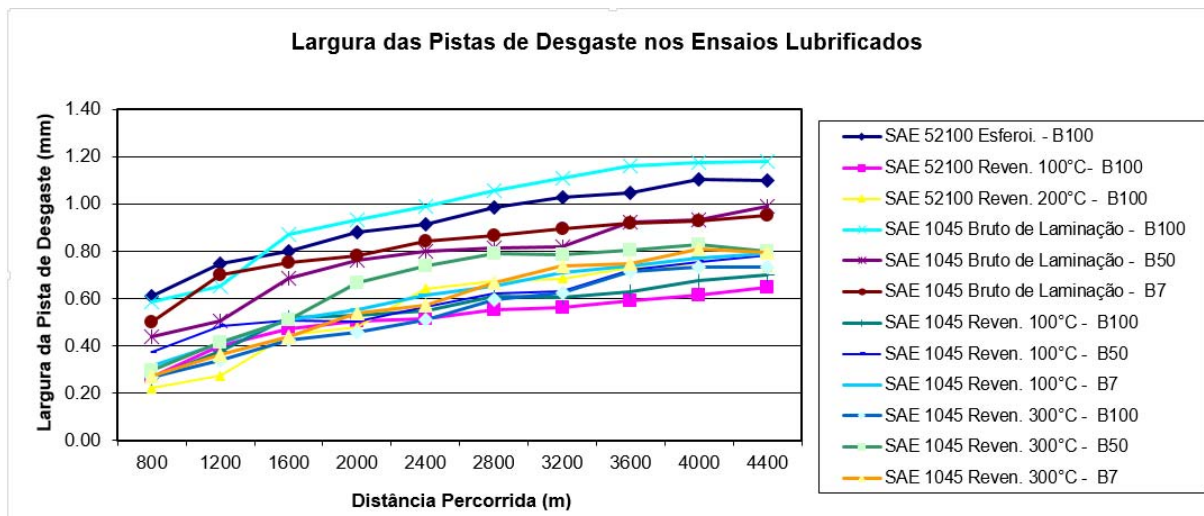


Figura 3. Largura da Pista de Desgaste nos Ensaios Lubrificados

Os resultados obtidos na análise da Microdureza Superficial nas amostras estudadas, Volume Desgastado, Perda de Massa e Coeficiente de Desgaste das diferentes condições de análise propostas são apresentados na Tabela 4.

Devido ao encruamento gerado pelo ensaio de desgaste, a Microdureza Vickers apresentou um aumento significativo na pista de desgaste após o ensaio, tanto no ensaio com ausência de lubrificação, quanto nos ensaios lubrificadas. Comparando os resultados de aumento percentual de dureza ocorrido nas amostras, ocorreu uma tendência de maior aumento percentual de dureza nos ensaios lubrificadas, pois, a fricção da esfera de alumina removeu uma quantidade inferior de material, porém, deformou plasticamente a região da pista de desgaste.

Os Coeficientes de Desgaste nas amostras de aço SAE 52100 indicaram um aumento significativo da resistência ao desgaste nas análises realizadas com lubrificação de biodiesel B100. O aumento percentual da resistência mais significativa ocorreu na amostra com microestrutura esferoidizada, apresentando um aumento de aproximadamente 1036% na resistência ao desgaste. As amostras do aço SAE 52100 temperado e revenido a 100°C e temperado e revenido a 200°C apresentaram um aumento na resistência ao desgaste de 442% e 328,57% respectivamente.

A análise dos coeficientes de desgaste dos ensaios a seco das amostras de aço SAE 1045, ao contrário do que se esperava, indicaram que a condição mais severa de desgaste esteve presente no ensaio do material temperado e revenido a 100°C. Nos ensaios lubrificadas, o coeficiente de desgaste médio obtido na análise da amostra de aço SAE 52100 no estado bruto de laminação, lubrificado com biodiesel B100 apresentou o maior valor, enquanto o menor coeficiente de desgaste encontrado nesta amostra foi obtido no ensaio realizado com diesel B50. Porém, nas amostras temperadas e revenidas de alta dureza, o coeficiente de desgaste médio encontrado nas análises com biodiesel B100 obteve um valor substancialmente inferior aos coeficientes encontrados nos ensaios com os lubrificantes B50 e B7, que ficaram com resultados muito próximos. Assim, a variação encontrada entre as análises de biodiesel B100 em relação aos demais lubrificantes nas amostras de aço SAE 1045 temperado e revenido a 100°C ficou 37,5% menor aos obtidos com

lubrificantes B50 e B7. No aço SAE 1045 temperado e revenido a 300°C, a diferença ficou em 31,81% menor nas análises com B100 na comparação com B50 e 45,45% menor para o B100 na comparação entre B100 e B7.

Tabela 4. Resultados Obtidos na Largura Média da Pista de Desgaste, Microdureza e Coeficiente de Desgaste

	Amostra	Largura Média da Pista de Desgaste - 4400m (mm)	Desvio Padrão (Largura da Pista de Desgaste)	Coeficiente de Desgaste Médio k ($\times 10^{-2}$)	Microdureza Vickers (HV)		Aumento Percentual de Dureza (%)
Com Ausência de Lubrificação	SAE 52100 Esferoidizado	1,62	0,30	0,25	238	248,2	19,41
	SAE 52100 Temp./Reve. A 100°C	1,10	0,03	0,076	798,83	814,67	1,98
	SAE 52100 Temp./Reve. A 200°C	1,19	0,092	0,09	720	709,83	1,5
	SAE 1045 Bruto de Laminação	2,15	0,21	0,16	198,2	212,71	7,32
	SAE 1045 Temp./Reve. A 100°C	2,19	0,20	0,18	633,15	693,12	9,47
	SAE 1045 Temp./Reve. A 300°C	1,47	0,14	0,15	632,67	692,75	9,49
Lubrificado com B100	SAE 52100 Esferoidizado	1,10	0,32	0,021	215,5	263,33	22,19
	SAE 52100 Temp./Reve. A 100°C	0,65	0,02	0,014	727,17	787,17	8,25
	SAE 52100 Temp./Reve. A 200°C	0,73	0,02	0,021	733,5	766,5	4,49
	SAE 1045 Bruto de Laminação	1,18	0,11	0,028	238,83	298	25,21
	SAE 1045 Temp./Reve. A 100°C	0,70	0,06	0,015	596,33	674,1	13,04
	SAE 1045 Temp./Reve. A 300°C	0,073	0,03	0,018	586,33	674	14,95
Lubrificado com B50	SAE 1045 Bruto de Laminação	0,99	0,05	0,016	198,2	212,71	7,32
	SAE 1045 Temp./Reve. A 100°C	0,79	0,05	0,021	595	674	13,27
	SAE 1045 Temp./Reve. A 300°C	0,80	0,02	0,022	584,42	615,58	11,18
Lubrificado com B7	SAE 1045 Bruto de Laminação	0,95	0,10	0,013	197,5	282,5	43,03
	SAE 1045 Temp./Reve. A 100°C	0,79	0,06	0,025	651,5	761,67	16,91
	SAE 1045 Temp./Reve. A 300°C	0,80	0,06	0,025	606,83	628,5	3,57

O comportamento dos coeficientes de desgaste nas amostras dos dois aços avaliados neste estudo é ilustrado nas Figuras 4.

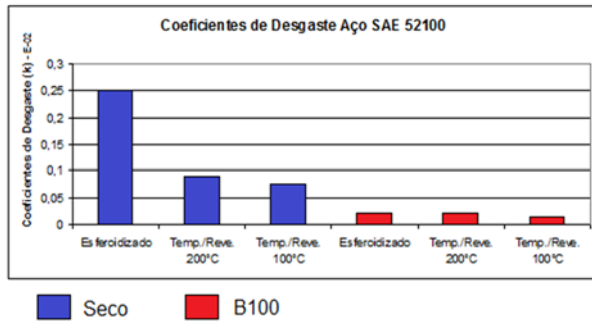


Figura A. Aço SAE 52100

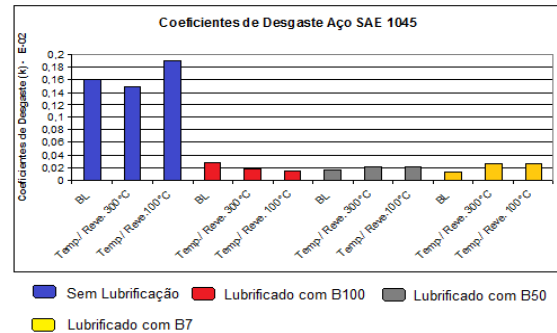
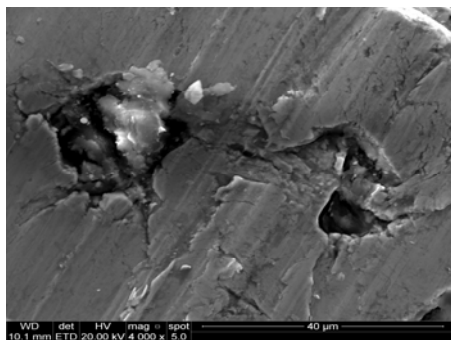
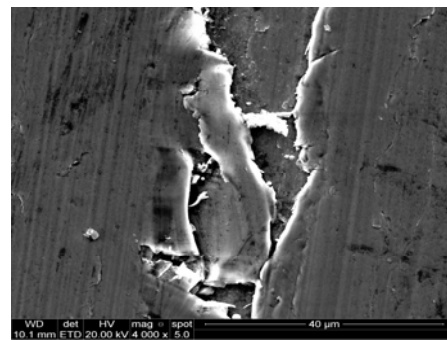
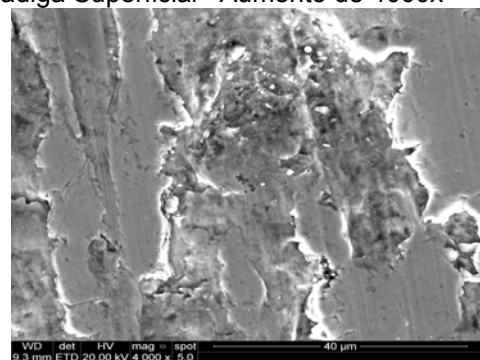
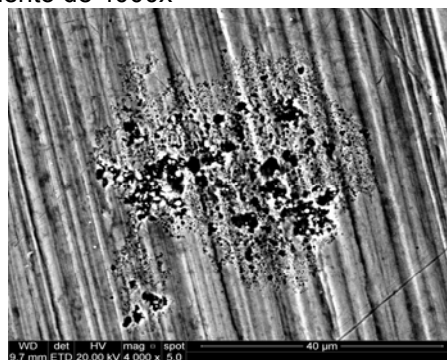


Figura B. Aço 1045

Figura 4. Gráfico de Barras que Ilustram o Comportamento dos Coeficientes de Desgaste (k)

As análises microscópicas, ilustradas na Figura 5, realizadas nas pistas de desgaste apresentaram sulcos e ranhuras no sentido do deslizamento da esfera, gerados pelo mecanismo de desgaste abrasivo, similares aos encontrados em [9]. Nas amostras de aço SAE 1045, estiveram presentes microcraterações decorrentes de fadiga superficial, imposta por tensões cíclicas. As amostras de aço SAE 52100 não apresentaram craterações. Portanto, o material se mostrou resistente à fadiga superficial. A morfologia dos defeitos superficiais encontrados nas amostras deste aço ilustrou o papel fundamental que os carbeto de cromo têm no aumento da resistência ao desgaste deste material [7].

**A** - SAE 1045 Bruto de Laminação Lubrificado com B50 Apresentando crateração decorrente de Fadiga Superficial- Aumento de 4000x**B** - SAE 1045 Bruto de Laminação sem Lubrificação Apresentando Escoriação- Aumento de 4000x**C** - SAE 52100 Esferoidizado, sem lubrificação, Apresentando Desgaste Severo - Aumento de 4000x**D** - SAE 52100 Temperado e Revenido a 200°C, apresentando arrancamento da matriz metálica ao redor dos carbeto de cromo e escoriações - sem lubrificação, Aumento de 4000x**Figura 5.** Comportamento dos Coeficientes de Desgaste (k). a) Aço SAE 52100; b) aço SAE 1045

Como não existiu compatibilidade metalúrgica entre a esfera de alumina e as amostras de aço, o mecanismo de desgaste adesivo não esteve presente nestes ensaios.

5. CONCLUSÃO

- Os Coeficientes de Desgaste Médio do Aço SAE 52100 confirmaram que o biodiesel, a base de soja, produzido através da rota etílica, diminuiu significativamente a severidade do desgaste do material, trabalhando nas mesmas condições de velocidade e distância percorrida. A diminuição mais significativa (SAE 52100 Esferoidizado) reduziu em aproximadamente 1036,4%,
- Os desgastes gerados pelos ensaios sem lubrificação apresentaram uma tendência de aumento percentual de dureza menor se comparados aos ensaios com lubrificação, ou seja, devido à lubrificação, a fricção gerada pela esfera no disco durante o ensaio removeu uma quantidade inferior de material aos ensaios sem lubrificação, porém, deformaram plasticamente a mesma, sendo outro indício da validade dos resultados encontrados;
- Apesar do resultado encontrado no coeficiente médio de desgaste da amostra de SAE 1045 Bruto de Laminação, lubrificado com biodiesel B100, as demais amostras deste material, nas análises com B100, apresentaram coeficientes de desgaste médio inferiores aos obtidos nos demais lubrificantes (B50 e B7) aplicados no estudo, confirmando a tendência encontrada em [6,8];
- As imagens micrográficas obtidas no Microscópio Eletrônico de Varredura indicaram que o principal mecanismo de desgaste atuantes nos ensaios sem lubrificação e lubrificadas foi o desgaste abrasivo [9]. As amostras de aço SAE 1045 apresentaram craterações formadas por fadiga superficial [5].

Agradecimentos

Agradecimento a CAPES pela bolsa concedida.

REFERÊNCIAS

- 1 Hutchings, I. M. Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials. 2°. Edward Arnold. Londres. 1992.
- 2 Tomanik, E. Modelamento do Desgaste por Deslizamento em Anéis de Pistão de Motores de Combustão Interna. Dissertação. Escola Politécnica de São Paulo, 2000.
- 3 Bressan, J. Resistência ao Desgaste Abrasivo de Aços Ferramenta Avaliada por Meio do Ensaio Pino-Disco. 2011 [acesso em 02 fev.2015].
- 4 ASTM G99-95, Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus. American Society for Testing and Materials. ASM Society: United States, 5 p., 1995.
- 5 Norton, R. Projeto de Máquinas., 2°. Porto Alegre: Bookman; 2004.
- 6 Verdi, J. Dispositivo Pino-Sobre-Disco para Análise de Desgaste na Presença de Diesel e Biodiesel. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, 2011.
- 7 Schemmel, I, et. al.. Microstructural aspects determinig the adhesive wear of tool steels. Wear, v. 260, pp.1028-1034, 2006.
- 8 Farias, A.C., et. al. Micro and Nanometric Wear Evaluation of Metal Discs Used on Determination of Biodiesel Fuel Lubricity. São Carlos, Vol. 17, 2014.
- 9 Lyu, Y., Wear between Wheel and Rail: A Pin-on-Disc Study of Environmental Conditions and Iron Oxides; Wear, 2015.