

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO GRANDE DO NORTE
CAMPUS DE NATAL
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA**

CAIO MENDONÇA DE ANDRADE

**DESGASTE DE PEÇAS METÁLICAS EM MOTORES ALIMENTADOS POR
BIODIESEL OBTIDO POR MEIO DE ÓLEO RESIDUAL**

NATAL/RN
2023

CAIO MENDONÇA DE ANDRADE

DESGASTE DE PEÇAS METÁLICAS EM MOTORES ALIMENTADOS POR
BIODIESEL OBTIDO A PARTIR DE ÓLEO RESIDUAL

Monografia apresentada ao Curso de Bacharelado em Ciência e Tecnologia como pré-requisito à conclusão da disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso.

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª Lilia Basílio de Caland.

NATAL/RN
2023

© Todos os direitos estão reservados a Universidade do Estado do Rio Grande do Norte. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do(a) autor(a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu(a) respectivo(a) autor(a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

**Catálogo da Publicação na Fonte.
Universidade do Estado do Rio Grande do Norte.**

A553d Andrade, Caio Mendonça de
Desgaste de peças metálicas em motores alimentados por biodiesel obtido por meio de óleo residual. / Caio Mendonça de Andrade. - Natal, 2023.
63p.

Orientador(a): Profa. Dra. Lilia Basílio de Caland.
Monografia (Graduação em Ciência e Tecnologia).
Universidade do Estado do Rio Grande do Norte.

1. Biodiesel. 2. Diesel mineral. 3. Lubrificação. 4. Desgaste. 5. Ensaio tribológico. I. Caland, Lilia Basílio de. II. Universidade do Estado do Rio Grande do Norte. III. Título.

CAIO MENDONÇA DE ANDRADE

**DESGASTE DE PEÇAS METÁLICAS EM MOTORES ALIMENTADOS POR
BIODIESEL OBTIDO POR MEIO DE ÓLEO RESIDUAL**

Monografia apresentada ao Curso de Bacharelado em Ciência e Tecnologia como pré-requisito à conclusão da disciplina Trabalho de Conclusão de Curso.

Aprovada em: ____/____/____.

BANCA EXAMINADORA

Prof^ª. Dr^ª. Lilia Basílio de Caland (Orientador) Universidade do Estado do Rio Grande do Norte – UERN

Prof. Jonatha Wallace da Silva Araújo (Membro da Banca) Universidade do Estado do Rio Grande do Norte – UERN

Thalita Queiroz e Silva (Membro da Banca) Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	JUSTIFICATIVA	4
3	OBJETIVOS.....	5
3.1	OBJETIVO GERAL.....	5
3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	5
4	METODOLOGIA.....	6
4.1	PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS DOS COMBUSTÍVEIS.....	6
4.2	PREPARAÇÕES DAS PEÇAS METÁLICAS	6
4.3	ENSAIOS DE DESGASTE.....	8
4.4.	ANÁLISE MORFOLÓGICA E QUÍMICA DOS DISCOS APÓS ENSAIOS DE DESGASTE.....	10
5	REFERENCIAL TEÓRICO.....	11
5.1.	BIODIESEL.....	11
5.2.	BIODIESEL OBTIDO POR MEIO DE ÓLEO DE FRITURA.....	12
5.3.	VANTAGENS DA UTILIZAÇÃO DO BIODIESEL	12
5.4.	PROPRIEDADES DO BIODIESEL.....	13
5.5.	CARACTERÍSTICAS DO BIODIESEL	13
5.6.	REAÇÃO DE OBTENÇÃO DO BIODIESEL.....	14
5.7.	PEÇAS METÁLICAS QUE COMPÕEM O MOTOR MOVIDO A DIESEL.....	16
5.7.1.	BLOCO DE CILINDROS	17
5.7.2.	CILINDROS DO MOTOR.....	17
5.7.3.	CABEÇOTE	18
5.7.4.	PISTÃO	19

5.7.5. CÁRTER.....	19
5.7.6. VIRABREQUIM OU ÁRVORE DE MANIVELAS	20
5.8. ENSAIOS TRIBOMÉTRICOS (ANÁLISE TRIBOLÓGICA DE DESGASTE)	20
5.9. INTERAÇÕES LUBRIFICANTES NOS COMPONENTES DO MOTOR	21
5.9.1. FORMAÇÃO DE FILME LUBRIFICANTE.....	21
5.9.2. REGIMES DE LUBRIFICAÇÃO	22
5.9.3. ESCARAS DE DESGASTE.....	23
6. COEFICIENTE DE FRICÇÃO	24
7 RESULTADOS E DISCUSSAO.....	25
7.1. RESULTADO DA ANÁLISE DO DESGASTE OCACIONADO NA SUPERFÍCIE DAS ESFERAS	32
7.2. ANÁLISE DE DESGASTE POR MEV	37
7.3. ANÁLISE DE DESGASTE POR EDS.....	42.
CONSIDERAÇÕES FINAIS	46
REFERÊNCIAS.	48

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que está à frente de tudo, desde o meu ingresso na instituição até os dias atuais. Muitos foram os desafios nesta caminhada, pois não é fácil entrar, permanecer e concluir o curso diante de todos os acontecimentos vividos. Ensino remoto e uma pandemia que deixou e ainda deixa muitas marcas e danos no mundo inteiro. Agradeço aos meus pais, irmãos e familiares. Em especial aos meus pais, que sempre estiveram e estão comigo nesta caminhada pela educação, respeito, cuidado e orientações. Sou extremamente grato, pois família é a base de tudo. Agradeço a todos os meus professores, que os considero grandes mestres dignos de todo respeito. Em especial a professora Lilia Basílio pela força, pela oportunidade de participar do projeto, pelos conhecimentos, pelas broncas, exigências e críticas. Agradeço a UERN e ao PIBIC pelo apoio financeiro, por ter me proporcionado novos conhecimentos e mais experiência no projeto. Agradeço aos meus colegas de turma, com quem também aprendi muitas coisas durante o curso. Muito obrigado a todos que me ajudaram direta e indiretamente a chegar até aqui. Levarei para minha vida todo o aprendizado. Muito obrigado!

RESUMO

O biodiesel é um combustível renovável, biodegradável e mais sustentável que o diesel mineral, feito a partir de óleos vegetais e gorduras animais por meio da reação de transesterificação com álcool. O diesel mineral é um produto inflamável obtido a partir do petróleo bruto, sendo utilizado em motores de combustão interna e ignição por compressão. É o combustível mais utilizado no Brasil. O objetivo deste trabalho foi analisar o desgaste de um aço por meio de ensaios mecânicos realizados em um equipamento tribômetro HFRR (*High Frequency Reciprocating Rig*) com a presença do biodiesel de óleo de fritura. Para este trabalho, utilizou a pesquisa experimental para desenvolver um estudo sobre a resistência ao desgaste de materiais de aço quando submetidos ao biodiesel e diesel. As amostras de biodiesel foram preparadas em triplicatas e as peças de aço foram preparadas por usinagem e polimento para avaliação da lubrificidade do biodiesel no aparelho HFRR. Os ensaios de desgaste foram realizados no aparelho tribômetro HFRR, monitorando parâmetros como carga, velocidade de deslizamento, distância de deslizamento e temperatura, coeficiente de atrito e formação de filme. Foram adotados parâmetros específicos para o ensaio de desgaste disco-esfera, como temperatura do fluido, volume do fluido, comprimento do curso, frequência de oscilação, umidade relativa, carga aplicada, duração do ensaio, número de ciclos, velocidade e distância de deslizamento total. O conhecimento sobre o desgaste nas peças de um motor é crucial tanto no ramo profissional da manutenção como da engenharia, pois o desgaste mecânico nos elementos que compõem as máquinas é o fator principal quando se fala de perda de desempenho e rendimento, além de impactar economicamente de forma direta e indireta. Os resultados apresentados foram obtidos a partir de cinco ensaios realizados com a amostra de B100 do biodiesel obtido a partir do óleo de fritura, analisado na bancada do HFRR. Houve uma dispersão dos valores apresentados para a mesma amostra, assim como as características de desgaste cada par tribológico esfera-disco. O coeficiente de atrito e o desgaste estão relacionados, e o biodiesel (B100) pode não ter sido eficaz na redução do atrito e desgaste. Fatores como pressão, carga e armazenamento afetam o desgaste das esferas em ensaios tribológicos, e as diferenças nos resultados estão relacionadas a diferentes condições experimentais. Portanto, eles foram muito importantes para avaliar o desempenho e a durabilidade dos materiais.

Palavras chave: Biodiesel, diesel mineral, lubrificação, desgaste, ensaio tribológico.

ABSTRACT

Biodiesel is a renewable, biodegradable and more sustainable fuel than mineral diesel, made from vegetable oils and animal fats through a transesterification reaction with alcohol. Mineral diesel is a flammable product obtained from crude oil, used in internal combustion and compression ignition engines. It is the most used fuel in Brazil. The objective of this work was to analyze the wear of a steel through mechanical tests carried out in a HFRR (High Frequency Reciprocating Rig) tribometer equipment with the presence of biodiesel from frying oil. For this work, he used experimental research to develop a study on the wear resistance of steel materials when subjected to biodiesel and diesel. The biodiesel samples were prepared in triplicates and the steel parts were prepared by machining and polishing to evaluate the lubricity of the biodiesel in the HFRR apparatus. The wear tests were carried out in the HFRR tribometer device, monitoring parameters such as load, sliding speed, sliding distance and temperature, coefficient of friction and film formation. Specific parameters were adopted for the disc-sphere wear test, such as fluid temperature, fluid volume, stroke length, oscillation frequency, relative humidity, applied load, test duration, number of cycles, speed and total sliding distance . Knowledge about wear on engine parts is crucial both in the professional field of maintenance and engineering, as mechanical wear on the elements that make up machines is the main factor when talking about loss of performance and yield, in addition to having an economic impact. directly and indirectly. The results presented were obtained from five tests performed with the B100 biodiesel sample obtained from frying oil, analyzed on the HFRR bench. There was a dispersion of the values presented for the same sample, as well as the wear characteristics of each sphere-disk tribological pair. The coefficient of friction and wear are related, and biodiesel (B100) may not have been effective in reducing friction and wear. Factors such as pressure, load and storage affect ball wear in tribological tests, and differences in results are related to different experimental conditions. Therefore, they were very important to evaluate the performance and durability of the materials.

Keywords: Biodiesel, mineral diesel, lubrication, wear, tribological tests.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Dimensões do disco e da esfera de aço.	7
Figura 2- Bancada com equipamento tribômetro HFRR para avaliação do par Esfera-Disco	8
Figura 3- Reação para obter o biodiesel	15
Figura 4- Reação de Transesterificação de um triglicerídeo com metanol por hidróxido de potássio.	15
Figura 5- Motor movido a diesel	16
Figura 6- Bloco de Cilindros do motor	17
Figura 7- Cilindro	18
Figura 8- Cabeçote do motor	18
Figura 9- Pistão	19
Figura 10- Cárter	19
Figura 11- Virabrequim	20
Figura 12- Regimes de Lubrificação	22
Figura 13- Gráfico do ensaio 1: Coeficiente de atrito e formação de filme em função do tempo lubrificado com o B100 obtido.	25
Figura 14- Gráfico do ensaio 2: Coeficiente de atrito e formação de filme em função do tempo lubrificado com o B100.	26
Figura 15-. Aspectos das superfícies do disco metálico.	29
Figura 16- Gráfico do ensaio 3: Coeficiente de atrito e formação de filme em função do tempo lubrificado com o B100.	30
Figura 17- Gráfico do ensaio 4: Coeficiente de atrito e formação de filme em função do tempo lubrificado com o B100.	31

Figura 18- Gráfico do ensaio 5: Coeficiente de atrito e formação de filme em função do tempo lubrificado com o B100.	31
Figura 19- Imagens das superfícies de contato das esferas, antes a após o primeiro ensaio no HFRR.	33
Figura 20- Imagens das superfícies de contato das esferas, antes a após o segundo ensaio no HFRR.	33
Figura 21- Imagens das superfícies de contato das esferas, antes a após o terceiro ensaio no HFRR.	34
Figura 22- Imagens das superfícies de contato das esferas, antes a após o quarto ensaio no HFRR.	35
Figura 23- Imagens das superfícies de contato das esferas, antes a após o quinto ensaio no HFRR.	35
Figura 24- Avaliação das imagens das medidas do tamanho das escaras ocasionadas na superfície do disco após o quarto ensaio, analisadas no MEV.	37
Figura 25- Avaliação das imagens das medidas do tamanho das escaras ocasionadas na superfície do disco após o quarto ensaio, analisadas no MEV.	38
Figura 26- Representação do desgaste da zona de contato do disco com a esfera após o Experimento 4 no HFRR.	39
Figura 27- representação do desgaste da zona de contato do disco com a esfera após o Experimento 5 no HFRR.	40
Figura 28- Análise 1 no EDS após a realização do Experimento 4 no HFRR.	42
Figura 29- Análise 2 no EDS após a realização do Experimento 4 no HFRR.	42
Figura 30- Análise 3 no EDS após a realização do Experimento 4 no HFRR.	43
Figura 31- Análise 1 no EDS após a realização do Experimento 5 no HFRR.	43

Figura 32- Análise 2 no EDS após a realização do Experimento 5 no HFRR. 44

Figura 33- Análise 3 no EDS após a realização do Experimento 5 no HFRR. 44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Composição do Aço dos Discos (SAE 1045).	7
Tabela 2- Composição do Aço das Esferas (AISI 52100).	7
Tabela 3- Condições do ensaio de lubricidade no aparelho HFRR (ASTM D 6079-04).	9
Tabela 4- Resultados de coeficiente de atrito e formação de filme em função do tempo lubrificado com o B100 obtido de óleo residual obtidos após os 5 experimentos realizados no HFRR.	32
Tabela 5- Resultados do tamanho das escaras ocasionadas na superfície das esferas durante os cinco ensaios realizados no HFRR.	36

1. Introdução

O Biodiesel é um combustível renovável, biodegradável e ambientalmente correto, sucedâneo ao óleo diesel mineral, constituído de uma mistura de ésteres metílicos ou etílicos de ácidos graxos, obtidos da reação de transesterificação de qualquer triglicerídeo com um álcool de cadeia curta, metanol ou etanol, respectivamente (PARENTE, 2005).

Derivado de fontes renováveis como óleos vegetais e gorduras animais, e estimulados por um catalisador, eles reagem quimicamente com álcool. Trata-se de um biocombustível que substitui total ou parcialmente o diesel oriundo do petróleo. Tanto por ser um combustível mais correto ambientalmente, oriundo de fontes renováveis, de caráter sustentável, como também por ser uma alternativa um pouco mais em conta se comparado ao diesel de origem mineral devido ao elevado preço do barril de petróleo. Nesse contexto, pode ser utilizado em motores de caminhões, ônibus, tratores, caminhonetes e outras máquinas geradoras de energia.

Obtido a partir do petróleo bruto, o óleo diesel é um produto inflamável, medianamente tóxico, pouco volátil, isento de material em suspensão e possui odor forte e característico. É um combustível formado por ligações de átomos de carbono e hidrogênio (hidrocarbonetos) em baixas concentrações por enxofre, nitrogênio e oxigênio. Utilizado em motores de combustão interna e ignição por compressão, é o combustível mais utilizado no Brasil, pois tem grandes aplicações nos setores rodoviário (quando utilizado em carros, ônibus, furgões e caminhões) e industrial (quando utilizado em geradores elétricos ou para manter o aquecimento em caldeiras).

As frações chamadas de óleo diesel leve e pesadas são obtidas durante o seu refino por meio do processo de destilação fracionada. Entretanto, estas são essenciais para a produção do óleo diesel. A uma temperatura entre 250°C e 350°C podem ser associadas outras frações, como a nafta, o querosene e o gasóleo leve. Contudo, a proporção desses componentes permite enquadrar o produto final em especificações previamente definidas para de favorecer melhor desempenho do produto e, por sua vez, minimizar o desgaste prematuro das peças dos motores, e conseqüentemente, manter a emissão de poluentes, gerados na queima do produto, em níveis aceitáveis.

O uso de biodiesel gera uma série de benefícios, tais como o aumento no número de empregos e melhora da economia, principalmente a rural; diminuição da dependência de importação de combustíveis, redução da poluição e praticamente ausência de contribuição ao aquecimento global. Entretanto, a utilização deste combustível implica no contato direto entre o combustível e os componentes metálicos utilizados em sistemas de transporte e armazenamento, o que pode ocasionar a corrosão (SAVITA KAUL ET AL, 2007; HASEEB ET AL, 2010).

De acordo com Grandó (2005), a crescente demanda por combustíveis renováveis como alternativa aos combustíveis fósseis e a maior preocupação internacional com o aquecimento global, amplificada agora com a entrada em vigor do Protocolo de Kyoto, evidencia os benefícios dos biocombustíveis. O biodiesel contribuirá para melhorar as condições ambientais a partir da redução da emissão de gases poluentes.

Nos últimos anos, houve uma necessidade de fornecer combustíveis ambientalmente corretos, principalmente quando falamos da sua utilização em motores de ignição por compressão. Este fato determina a redução gradual de compostos de enxofre, aromáticos, polares e de materiais particulados. Nesse sentido, a diminuição do teor destes compostos no diesel contribui para reduzir a poluição do meio ambiente além de sua lubricidade. Desta forma, faz com que aumente o desgaste de componentes do sistema de injeção de combustível.

É importante ressaltar que o conhecimento a respeito do desgaste nas peças de um motor é crucial tanto no ramo profissional da manutenção como da engenharia. Pois o desgaste mecânico nos elementos que compõem as máquinas é o fator principal quando se fala de perda de desempenho e rendimento, além de impactar economicamente de forma direta e indireta. Trata-se de um processo que ocorrem danos superficiais causados pela interação mecânica com outra superfície, corpo ou fluido.

A natureza corrosiva do biodiesel pode ser agravada caso haja resíduos de água ou ácidos graxos resultantes do processo de transesterificação. Os processos de auto-oxidação, ocorrentes devido à baixa estabilidade oxidativa do biodiesel alteram as propriedades iniciais do combustível, aumentando a capacidade de corroer equipamentos e estruturas metálicas de sistemas veiculares (FAZAL ET AL, 2010).

Vários substratos metálicos são utilizados nos sistemas automotivos, tais como tanques e chapas de aço carbono revestidas ou não por zinco; ligas de zinco-ferro, zinco-alumínio ou até zinco-níquel, alumínio, chumbo e estanho. Materiais que possuem uma boa relação custo-benefício também são utilizados, como aço galvanizado e aço inoxidável no sistema de injeção do veículo (AMBROZIN, 2009; SUSUKI, 2007; HASEEB et al, 2011).

Estudos preliminares indicam que o aço carbono em contato com o biodiesel sofre alterações em sua morfologia, e que há perda de massa de acordo com o tempo de imersão no combustível. Por sua vez, o aço inoxidável é capaz de formar filmes finos, que protegem o metal de ataques pelo combustível. Os estudos realizados com amostras metálicas apontam que quanto maior a impureza do biodiesel, maiores os efeitos do processo corrosivo (MARU ET AL, 2009; NOCKERT ET AL, 2012).

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

Com a rápida modernização e o desenvolvimento tecnológico, o combustível não só é necessário para fornecer energia, mas também lubricidade. Ele deve emitir pouca poluição e ser quimicamente estável, sem afetar o ambiente. Portanto, aditivos lubrificantes devem ser incorporados para reduzir o enxofre do diesel, por exemplo. Assim, o uso de biodiesel é uma preocupação crescente. (FAZAL. 2010 e 2013).

A lubricidade do combustível do motor é um fator importante no prolongamento da vida útil do mesmo. O combustível também reduz o consumo de energia através da minimização do atrito entre as peças móveis. Em particular, o combustível do motor lubrifica os injetores e bombas de combustível de alta pressão em motores veiculares. Sua capacidade de lubrificação é influenciada pela temperatura de admissão de combustível, acima de 60°C. Avaliando as propriedades de lubrificação, o biodiesel poderá atender a demanda e as necessidades como aditivo ou combustível. (HABIBULLAH, 2015 e LIAQUAT, 2013).

Portanto, para que um combustível automotivo seja aceito como tal, é necessário que ele seja energeticamente eficiente, garanta a durabilidade do motor e também seja oferecido em quantidade maior ou igual à sua demanda. Nesse contexto, para que a utilização do biodiesel seja viável para área automotiva, o Governo Federal incentiva o Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel. Desta forma, este trabalho tem como objetivo avaliar se o desempenho do motor é comprometido quando o mesmo for alimentado por biodiesel ou por uma mistura de biodiesel, estudar o comportamento do desgaste das peças metálicas e também das causas da quebra de anéis em pistões de veículos alimentados por biodiesel e suas misturas.

2. Justificativa

Esta pesquisa dedica-se ao estudo da influência do biodiesel na minimização do atrito entre os componentes e as peças móveis do motor se comparado ao uso dos combustíveis convencionais a base de petróleo. Por meio dessa investigação, acredita-se ser possível saber também se ele será energeticamente eficiente para um bom funcionamento e durabilidade do motor.

A realização deste trabalho se dá pelo motivo da crescente necessidade do fornecimento de combustíveis para a utilização em motores de ignição que mais fossem mais corretos ambientalmente e que contribuam gradualmente para a redução de compostos de enxofre e outros materiais suspensos no ar. Nesse sentido, faz com que o teor desses compostos no diesel seja menor e, conseqüentemente, reduz a poluição no meio ambiente.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

Analisar o desgaste de um aço inoxidável, por meio de ensaios mecânicos realizados em um equipamento tribômetro de HFRR (High Frequency Reciprocating Rig) com a presença do biodiesel sem lubrificação.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Avaliar o desgaste do material na presença do biodiesel de óleo residual, analisando os aspectos como pista de desgaste, volume desgastado e aspectos da superfície de desgaste.

Analisar a morfologia do desgaste dos discos após os ensaios de desgaste através de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

Analisar desgaste químico dos discos após os ensaios de desgaste através da técnica de Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS).

Identificar alguma correlação físico-química entre as amostras de aço e o biodiesel na propriedade de lubricidade.

4. METODOLOGIA

Para o desenvolvimento deste trabalho foi necessário fazer o uso dos meios da pesquisa experimental, pois este tem como base vários experimentos em sua representação. Devido ao fato de analisar um objeto de estudo e possuir certa quantidade de variáveis, foi muito importante, ao trabalhar com o biodiesel, fazer a definição dos parâmetros e também das formas de controles utilizadas.

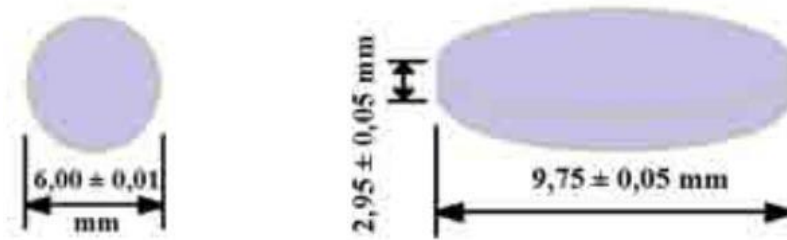
4.1 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS DOS COMBUSTÍVEIS

Utilizou-se amostras de biodiesel de óleo de fritura obtidas, por reação de transesterificação, cedidas de trabalhos anteriores do nosso grupo de pesquisa. As amostras de biodiesel, B100 (biodiesel de óleo residual) foram preparadas em triplicatas.

4.2 PREPARAÇÕES DAS PEÇAS METÁLICAS

O aço é um dos componentes mais utilizados em motores automotivos, pois é um material resistente às altas pressões, temperaturas e também à corrosão. Nesse sentido, utilizaram-se discos planos de dimensões 9,75mm x 2,95mm (aço SAE1045) e esferas de 6 mm (aço AISI 52100) para avaliação de lubrificidade das misturas no aparelho HFRR. Para confeccionar o disco plano, foi feita a usinagem do material em um torno mecânico do Laboratório de Manufatura da UFRN, (NTI/UFRN). Para o acabamento superficial desses discos, as peças passaram por um processo de polimento com a abrasiva alumina no Laboratório de Caracterização de Materiais na UFRN. Esse procedimento foi realizado por meio da utilização de lixas (400, 600 e 1200) até atingirem a rugosidade média de $Ra=0,244 \mu\text{m}$ e um desvio padrão de 0,07. As peças com suas respectivas dimensões estão representadas na

Figura 1:

Figura 1: dimensões do disco e da esfera de aço utilizados.

Fonte: FARIAS. A.C. M (2011).

Tabela 1: Composição do Aço dos Discos (SAE 1045)

Elemento	Concentração (%)
Manganês, Mn	0,60 a 0,90
Carbono, C	0,42 a 0,50
Enxofre, S	0,05 (Max)
Fósforo, P	0,04 (Max)
Ferro, Fe	O que sobra

Fonte: Autor (2022).

Tabela 2: Composição do Aço das Esferas (AISI 52100)

Elemento	Concentração (%)
Carbono, C	0,98 a 1,1
Cromo, Cr	1,3 a 1,6
Ferro, Fe	96,5 a 97,32
Manganês, Mn	0,25 a 0,45
Fósforo, P	<= 0,025
Silício, Si	0,15 a 0,30
Enxofre, S	<= 0,025

Fonte: Autor (2022).

4.3 ENSAIOS DE DESGASTE

A propriedade de lubricidade dos combustíveis foi avaliada através de ensaios em uma sonda de movimento alternado sob alta frequência, a HFRR da PCS Instruments, disponível no Laboratório de Estudos de Tribologia e Integridade Estrutural (GET) da UFRN. Antes da execução do ensaio de lubricidade, realizou-se um procedimento de limpeza e secagem do par esfera/disco. Tais materiais metálicos foram colocados em um béquer, contendo álcool isopropílico, dentro de uma cuba do aparelho de banho ultrassônico por 15 minutos e após, secos e conectados nos respectivos suportes e conectados ao HFRR, **Figura 2**.

Figura 2: Bancada com equipamento tribômetro HFRR para avaliação do par Esfera-Disco.



Fonte: Autor (2022)

Os parâmetros de resistência e desgaste foram obtidos por meio de ensaios sem lubrificação no aparelho tribômetro HFRR. Foi feito o monitoramento dos parâmetros de carga (N), velocidade de deslizamento relativo entre as superfícies de contato (m/s), distância de deslizamento acumulado (m) e temperatura (°C), tais parâmetros foram pré-estabelecidos e estão apresentados na **Tabela 3**.

Tabela 3: condições do ensaio de lubricidade no aparelho HFRR (ASTM D 6079-04).

Temperatura do fluido (°C)	60 ± 2
Volume do fluido (mL)	$2,0 \pm 0,2$
Comprimento do curso (mm)	1
Frequência de oscilação (Hz)	50
Umidade Relativa (%)	> 30
Carga aplicada (N)	$1,96 \pm 0,01$
Duração do Ensaio (min)	$75 \pm 0,1$
Número de ciclos	225.000
Velocidade (m/s)	0,1
Distância de deslizamento total (m)	450

Fonte: Autor (2022).

O ensaio de desgaste disco-esfera é um procedimento fundamental para avaliar a resistência ao desgaste de materiais. Nesse sentido, os parâmetros adotados para a realização desse ensaio podem impactar diretamente nos resultados obtidos.

Neste estudo, utilizou-se o aparelho HFRR para a realização do ensaio, adotando-se os seguintes parâmetros: temperatura do fluido de 60 ± 2 °C, volume do fluido de $2,0 \pm 0,2$ mL, comprimento do curso de 1 mm, frequência de oscilação de 50 Hz, umidade relativa superior a 30%, carga aplicada de $1,96 \pm 0,01$ N, duração do ensaio de $75 \pm 0,1$ minutos, número de ciclos de 225.000, velocidade de 0,1 m/s e distância de deslizamento total de 450 m.

A temperatura do fluido foi controlada de forma precisa, garantindo que não houvesse variações significativas durante o ensaio. O volume do fluido foi determinado para garantir que a superfície do disco estivesse completamente imersa durante todo o ensaio. O comprimento do curso foi estabelecido em 1 mm, de forma a garantir que as esferas mantivessem contato com o disco durante todo o processo.

A frequência de oscilação de 50 Hz foi escolhida por ser um valor comum em ensaios desse tipo. A umidade relativa superior a 30% foi mantida para minimizar a interferência de possíveis reações químicas entre o fluido e o material. A carga aplicada de $1,96 \pm 0,01$ N foi selecionada para simular condições reais de uso.

A duração do ensaio foi de $75 \pm 0,1$ minutos, sendo que foram realizados 225.000 ciclos ao longo desse período. A velocidade de deslizamento foi fixada em 0,1 m/s, enquanto a distância total percorrida foi de 450 m.

Os parâmetros adotados neste ensaio foram cuidadosamente selecionados de forma a garantir resultados confiáveis e reproduzíveis. Com base nos dados obtidos, foi possível avaliar a resistência ao desgaste do material na presença do biodiesel de óleo de fritura.

4.4. ANÁLISE MORFOLÓGICA E QUÍMICA DOS DISCOS APÓS ENSAIOS DE DESGASTE

Logo após o teste, foi realizada uma análise química e morfológica do desgaste ocasionado na superfície do disco. As escaras geradas no aço das esferas foram analisadas com auxílio de um microscópio óptico Meiji Techno, modelo ML7000, interligado ao HFRR.

Posteriormente, realizou-se uma análise mais criteriosa, do desgaste ocorrido na zona de deslizamento por meio da utilização dos sistemas de microscópio eletrônico (MEV).

Além do MEV, foi utilizada a Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS), para avaliar informações da composição química de diferentes regiões (interna e externa a zona do deslizamento) do disco, após o ensaio de desgaste.

5. REFERENCIAL TEÓRICO

Tendo em vista que o biodiesel é derivado de fontes naturais como óleos vegetais e gorduras animais, é um combustível biodegradável e mais correto ambientalmente. Nesse sentido, ele pode ser substituído total ou parcialmente pelo diesel oriundo do petróleo.

Segundo Diesel 2012, usar óleos vegetais como combustível pode parecer insignificante nos dias de hoje. Mas esses óleos, ao longo do tempo, poderão se tornar tão importantes como o petróleo e o carvão mineral dos dias de hoje.

5.1. BIODIESEL

O Brasil se destaca pela grande diversidade de sua flora e fauna, vasta área territorial e condições climáticas que são favoráveis para se obter matérias-primas adequadas para a produção de biodiesel, tanto de fontes vegetais, como óleos vegetais e microalgas, quanto de fontes animais como sebo bovino, gordura de aves, de suínos, óleo de mocotó, óleos de peixes e óleos residuais (BILICH e DA SILVA, 2006).

Segundo Fazal 2010, a sua natureza corrosiva pode ser agravada caso haja resíduos de água ou ácidos graxos resultantes do processo de transesterificação. Os processos de auto-oxidação, ocorrentes devido à baixa estabilidade oxidativa do biodiesel alteram as propriedades iniciais do combustível, aumentando a capacidade de corroer equipamentos e estruturas metálicas de sistemas veiculares.

Contudo, os óleos vegetais constituem alternativa promissora para a substituição dos combustíveis derivados de petróleo em motores de ciclo diesel, pois apresentam propriedades de combustão semelhantes às do óleo diesel mineral, além de serem renováveis e propiciarem inúmeros benefícios ambientais. Mas por outro lado, caso o biodiesel tenha ácidos graxos resultantes da transesterificação ou resíduos de água, faz com que aumente mais a sua natureza corrosiva, ocasionando assim a capacidade de corroer as peças metálicas em um motor automotivo.

5.2. BIODIESEL OBTIDO POR MEIO DE ÓLEO DE FRITURA

O biodiesel é um combustível alternativo de queima limpa, derivado de biomassa renovável utilizado em motores de ciclo diesel com forte aplicação na área automotiva com a intenção de substituir parcialmente ou totalmente a eficiência mecânica dos combustíveis fósseis derivados de petróleo, sem nenhuma modificação. O biodiesel é completamente biodegradável, não tóxico e essencialmente livre de compostos sulfurados e aromáticos, o que o torna um combustível 100% ecológico. (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2017).

De maneira técnica, o biodiesel é definido como um combustível composto de aquil ésteres de ácidos carboxílicos de cadeia longa e que não apresenta nenhum rastro de petróleo em sua composição. Usualmente produzido pela reação química denominada transesterificação, cuja matéria prima principal é a gordura animal ou vegetal, sendo totalmente capaz de suprir as mesmas características e eficiências do óleo diesel de petróleo.

De acordo com Brieu (2009), o biodiesel ainda pode ser produzido por meio de óleo vegetal residual. Descartar óleos vegetais inadequadamente no meio ambiente, geralmente por ignorância e falta de conscientização da sociedade, é gravemente prejudicial e compromete principalmente e diretamente com a contaminação de rios e solos. Assim sendo, é possível encontrar alternativas para a destinação final do óleo vegetal rejeitado, com métodos de tratamento que viabilizem seu reuso a fim de se contribuir com a diminuição dos impactos ambientais, bem como a geração de renda.

5.3. VANTAGENS DA UTILIZAÇÃO DO BIODIESEL

O biodiesel, se comparado ao diesel comum derivado do petróleo, é um combustível oriundo de fontes de energia renováveis. Em relação à sua produção, esta se torna mais barata se comparada ao diesel oriundo do petróleo, levando-se em consideração os gastos com alta tecnologia, desenvolvimento e na perfuração de poços de petróleo. Pelo fato dele possuir baixo ponto de fulgor (inflamação), faz com que sua armazenagem seja mais segura. Além disso, pode ser usado em motores automotivos, pois não só oferece melhor funcionamento e desempenho como também se torna um ótimo lubrificante. Dessa maneira, aumentando mais a vida útil do motor.

O biodiesel oferece também a alternativa de ser produzido a partir da reciclagem do óleo vegetal residual descartado pela própria sociedade. Dessa forma, é considerável afirmar que existe a possibilidade de encontrar métodos de tratamento e destinação final desse óleo que viabilizem seu reuso a fim de contribuir com a diminuição dos impactos ambientais bem como a geração de renda (RABELO; FERREIRA, 2008).

5.4. PROPRIEDADES DO BIODIESEL.

O Brasil vem apresentando incomparáveis condições para plantio de oleaginosas com a finalidade de produzir cada vez mais biodiesel. Entre os tipos mais citados, está o biodiesel obtido por meio de óleo residual de fritura. Infelizmente, os óleos de fritura nem todas as vezes são descartados adequadamente.

Segundo a PETROBRÁS (2007), o biodiesel constitui combustível biodegradável derivado de fontes renováveis, que substitui total ou parcialmente o óleo diesel de fonte mineral nos motores de combustão interna de ciclo diesel, como os de caminhões, tratores, ônibus e outros veículos, ou em motores estacionários (como os utilizados para geração de energia elétrica).

Tanto suas características Conforme a Resolução ANP 07 de 19/03/2008, o biodiesel puro (B100) a ser misturado ao diesel de petróleo na proporção de 5% deve atender às especificações descritas na norma para qualquer fonte de matéria-prima.

A viscosidade cinemática e a densidade são propriedades fundamentais de combustível para motores diesel e afetam diretamente as características de desempenho do motor. Características de desempenho como número de cetano e poder calorífico estão relacionadas à densidade (ALPTEKIN; CANAKC, 2008)

5.5. CARACTERÍSTICAS DO BIODIESEL

De acordo com Ramos (2006), a grande importância da utilização do Biodiesel está nos aspectos positivos que ele apresenta em relação ao diesel convencional.

- É um biocombustível derivado de matérias primas de ocorrência natural. Sendo assim, tanto reduz a nossa dependência dos derivados do petróleo como também preservamos suas últimas reservas.

- Por ele ser de origem natural, gera a redução da emissão de compostos químicos aromáticos na atmosfera e também do aquecimento global.
- Devido a sua produção, se torna uma alternativa um pouco mais em conta se comparado ao diesel de origem mineral devido ao elevado preço do barril de petróleo.
- Gera redução na emissão de gases poluentes na atmosfera.
- É um composto que oferece baixo ponto de fulgor. No entanto, isso faz com que sua armazenagem seja mais segura e com um melhor manuseio.

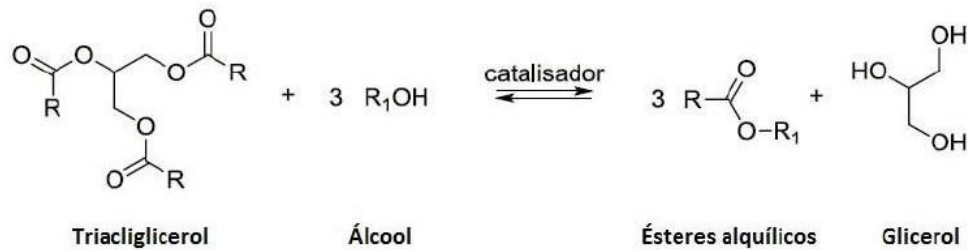
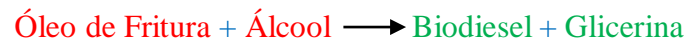
É importante salientar que pelo fato do biodiesel ter uma boa eficácia como combustível, é também uma biomassa muito importante. Embora ele possua características muito semelhantes às do óleo diesel convencional, não prejudica tanto o meio ambiente com gases poluentes de forma devastadora. Visto que o biodiesel é um óleo derivado de fontes como oleaginosas, o gás carbônico (CO₂) liberado pelo processo de combustão é reabsorvido pelas plantas e transformado em energia por meio do processo de fotossíntese. Portanto, diminui a emissão de gases poluentes na atmosfera que contribuem para ocasionar o efeito estufa.

5.6. REAÇÃO DE OBTENÇÃO DO BIODIESEL

O óleo que é utilizado residualmente para os processos de frituras passa por certa quantidade de reações. Essas reações ocasionam a formação de vários compostos indesejáveis. Entre elas, podemos citar os ácidos graxos livres. Isso faz com que alguns desafios sejam gerados no processo de reação de transesterificação.

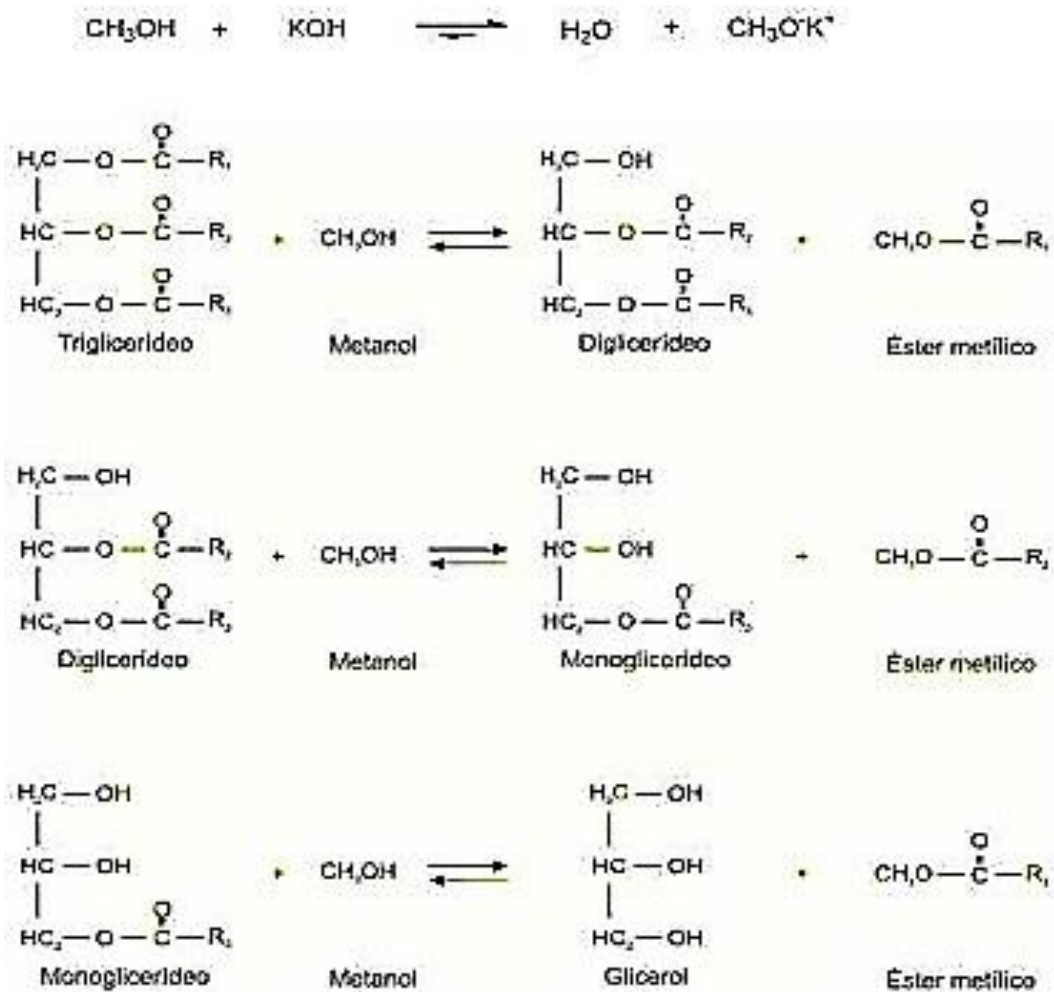
Primeiramente, é necessário preparar a matéria prima a ser utilizada para criar as melhores condições para a efetivação da reação de transesterificação, com a máxima taxa de conversão. Em princípio, é necessário fazer com que a matéria-prima tenha o mínimo de umidade e de acidez. A maneira mais simples e eficaz para tanto é proceder com uma lavagem com a utilização de uma solução alcalina de hidróxido de potássio ou sódio. Em seguida, desumidificar para que assim, a matéria prima seja completamente neutralizada e seca. (ENCARNAÇÃO, 2008)

Figura 3: Reação para obter o biodiesel



Fonte: Botelho, 2012, p. 63.

Figura 4: Reação de Transesterificação de um triglicérido com metanol por hidróxido de potássio.



Fonte: G. Z. BORGES et al, 2018, p. 3.

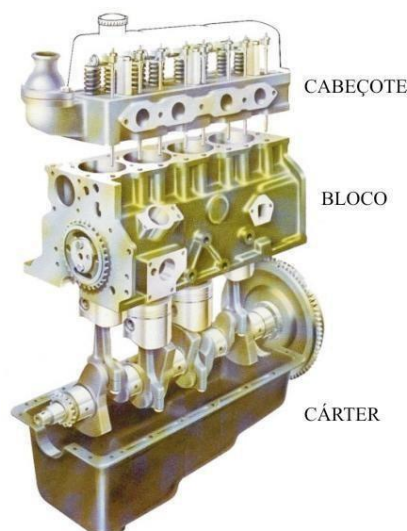
De acordo com Knothe et al. (2006), a glicerina formada juntamente com o biodiesel deve ser separada por meio da decantação. O biodiesel produzido deve ser lavado com cloreto de sódio para que o sabão, formado na reação secundária da transesterificação, possa ser retirado para que assim o produto final seja o mais puro possível. A glicerina é um subproduto que tem bastante valor econômico e é muito utilizado na indústria como um todo. Portanto sua purificação é de interesse comercial e pode ser realizado adicionando um ácido, já que o processo tem caráter básico, para neutralizar o sabão transformando-o em um ácido graxo e logo separado por decantação.

A síntese do biodiesel é finalizada com o procedimento de purificação. Esta etapa pode ser feita por via seca, a qual não utiliza água, gera uma menor quantidade de efluentes e é bastante condescendente na indústria, ou por via úmida, que utiliza usualmente água como solvente para a extração de impurezas na mistura.

5.7. PEÇAS METÁLICAS QUE COMPÕEM O MOTOR MOVIDO A DIESEL

O motor de um automóvel é um dispositivo capaz de armazenar energia e transformá-la em movimento. Na figura abaixo está a representação esquemática das peças de um motor automotivo.

Figura 5: motor movido a diesel

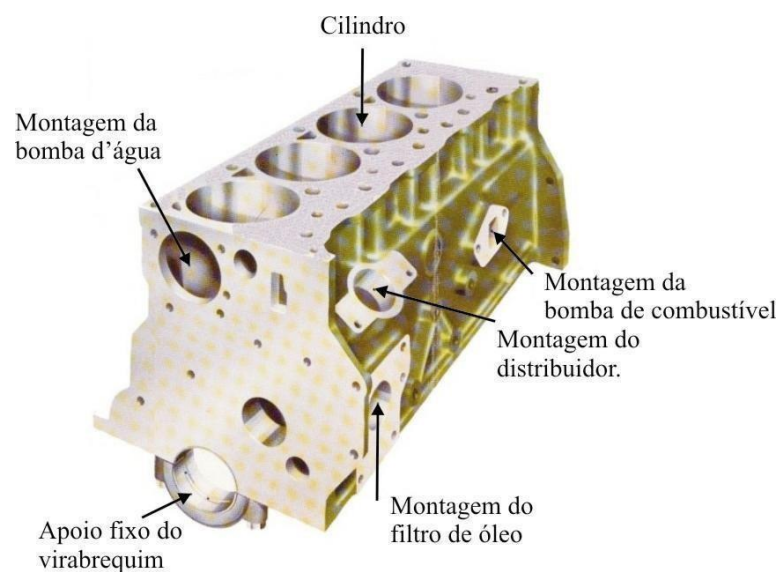


Fonte: Varella & Santos, (2010, p. 5).

5.7.1. BLOCO DE CILINDROS

O bloco de cilindros é a parte central de um motor automotivo. São, na sua maioria, de ferro fundido. A resistência do bloco pode ser aumentada, se for utilizada na sua fabricação uma liga de ferro fundido com outros metais. Alguns blocos de motor são fabricados com ligas de metais leves, o que diminui o peso e aumenta a dissipação calorífica. Neste caso o cilindro é revestido com camisa de ferro fundido.

Figura 6: Bloco de Cilindros do motor



Fonte: Varella & Santos, (2010, p. 7).

5.7.2. CILINDROS DO MOTOR

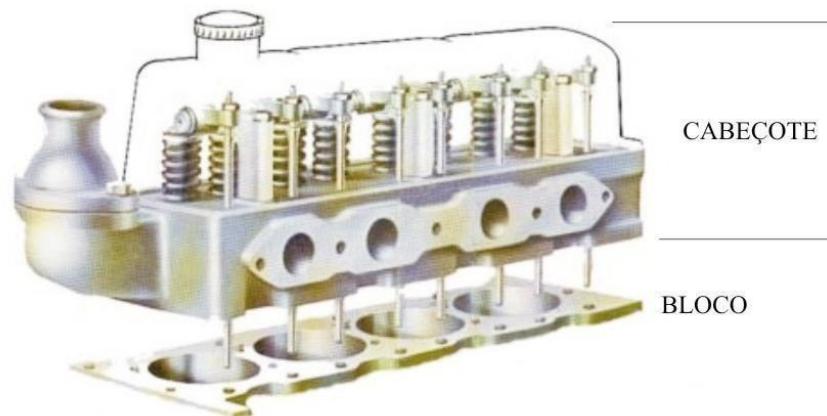
Um cilindro é a parte do bloco em que se desloca um pistão. Seu nome provém da forma aproximadamente cilíndrica que este possui. Para determinar a potência de um motor, é necessário levar em consideração a quantidade de mistura que explode no interior do cilindro. Assim sendo, os cilindros que possuem maior dimensão permitem que os motores atinjam maiores potências.

Figura 7: Cilindro

Fonte: Varela & Santos, (2010, p. 8).

5.7.3. CABEÇOTE

O cabeçote é a parte superior do motor. Normalmente os cabeçotes de motores resfriados a água são fabricados em ferro fundido, e em circunstâncias especiais que exige pouco peso, são fabricados em alumínio.

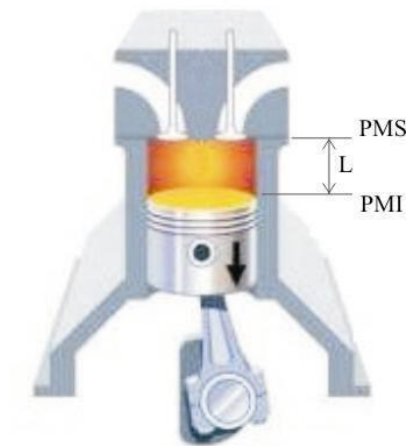
Figura 8: Cabeçote do motor

Fonte: Varela & Santos, (2010, p. 5).

5.7.4. PISTÃO

É fechado na parte superior e aberto na inferior. O pistão se movimenta linearmente no interior do cilindro percorrendo sempre uma mesma distância denominada de curso. Curso é a distância entre o ponto morto superior e o ponto morto inferior do pistão.

Figura 9: Pistão

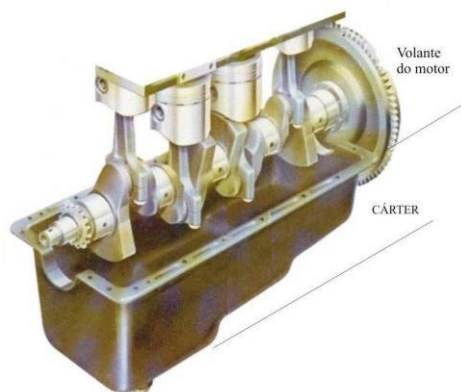


Fonte: Varella & Santos, (2010, p. 9).

5.7.5. CÁRTER

É responsável por armazenar o óleo lubrificante. Nos motores de quatro tempos é basicamente o reservatório de óleo lubrificante. É a parte do motor na qual está localizada bomba de óleo lubrificante.

Figura 10: Cáster

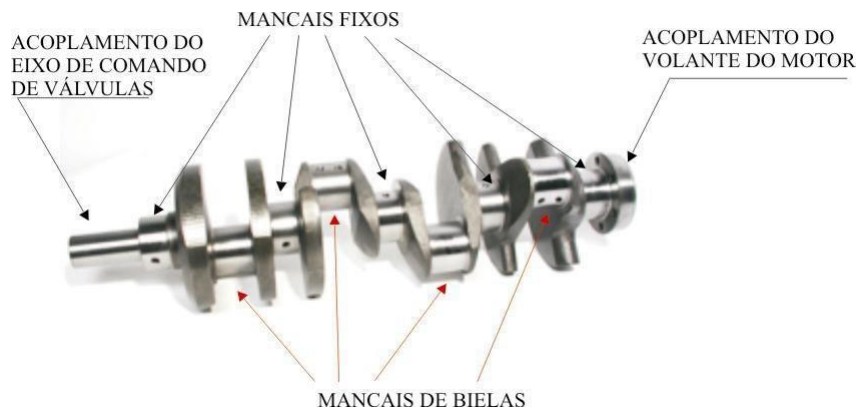


Fonte: Varella & Santos, (2010, p. 10).

5.7.6. VIRABREQUIM OU ÁRVORE DE MANIVELAS

É uma parte do motor que possui na extremidade posterior um flange para acoplamento do volante do motor e na extremidade anterior um eixo para transmissão de rotação ao eixo de comando de válvulas, diretamente engrenado ou por intermédio de corrente/correia dentada. São normalmente fabricadas em aço ou aço fundido.

Figura 11: Virabrequim



Fonte: Varella & Santos, (2010, p. 8).

5.8. ENSAIOS TRIBOMÉTRICOS (ANÁLISE TRIBOLÓGICA DE DESGASTE)

Os ensaios tribométricos têm o objetivo de analisar os parâmetros de resistência e desgaste. Esses parâmetros estão sendo realizados no aparelho HFRR (High Frequency Reciprocating Rig).

A análise tribológica do biodiesel é um estudo que busca entender os efeitos do uso desse biocombustível na lubrificação e no desgaste dos materiais que entram em contato com ele. A tribologia é a ciência que estuda a interação entre superfícies em movimento relativo e os efeitos dessas interações no desgaste, fricção e lubrificação.

Segundo Almeida 2020, Estudos recentes têm mostrado que a análise tribológica é fundamental para a compreensão dos mecanismos de desgaste e atrito em sistemas que envolvem contato entre superfícies.

No caso do biodiesel, a análise tribológica pode ajudar a determinar quais são os melhores materiais para uso em motores e outras máquinas que utilizam esse biocombustível, bem como identificar problemas relacionados ao desgaste excessivo de peças e à redução da eficiência do sistema.

5.9. INTERAÇÕES LUBRIFICANTES NOS COMPONENTES DO MOTOR

Para fazer o projeto de uma máquina, um dos pontos mais importantes a se levar em consideração é a escolha de bons lubrificantes. Pois eles, em contato com os componentes do motor, são responsáveis por amenizar o atrito entre as peças, diminuir a temperatura do motor, aumentando assim a sua vida útil e a eficiência do sistema.

Os automóveis estão presentes na nossa sociedade há muitos anos. No final do Século XIX, foi a época de surgimento dos primeiros protótipos de veículos com motores que trabalhavam por meio do princípio de funcionamento da combustão interna.

No início do século XX, a produção em larga escala foi tomando espaço, o produto começou a ficar cada vez mais popular na sociedade e aos poucos a indústria automotiva foi se tornando uma das maiores revoluções e de negócios no mundo inteiro.

Nos motores automotivos, assim como em todas as máquinas, também é bastante levado em consideração, além de um bom funcionamento, a questão da sua eficiência máxima e melhor desempenho. Um motor com uma boa potência, bom torque e aceleração, terá um melhor funcionamento. Tudo isso, aliado a um menor gasto de combustível possível (ELLWANGER. D, 2021).

Rosket ET al (2017) dizem que, as maiores perdas de energia no funcionamento de um motor automotivo estão relacionadas às bombas de óleos auxiliares e ao atrito entre o par pistão-cilindro.

5.9.1. FORMAÇÃO DE FILME LUBRIFICANTE

A formação de filme lubrificante é um fenômeno que ocorre quando um lubrificante é aplicado entre duas superfícies em contato, criando uma camada protetora que reduz o atrito e o desgaste das peças metálicas. Esse filme lubrificante pode ser formado por diferentes tipos de lubrificantes, incluindo óleos minerais, sintéticos ou biodegradáveis, e é

especialmente importante em motores alimentados por biodiesel, que podem apresentar maiores níveis de desgaste e corrosão devido à presença de ácidos e outros compostos corrosivos no biocombustível.

A formação de filme lubrificante pode ser influenciada por diversos fatores, incluindo a viscosidade e o tipo de lubrificante utilizado, a temperatura e a pressão de contato entre as superfícies em atrito. Além disso, a escolha do lubrificante adequado pode ser crucial para minimizar o desgaste e prolongar a vida útil das peças metálicas em motores alimentados por biodiesel.

5.9.2. REGIMES DE LUBRIFICAÇÃO

Segundo Hamrock et.al 2004, lubrificante é qualquer substância capaz de reduzir o atrito e o desgaste entre as superfícies de contato das peças de um motor. Com isso, promove movimentos e interações mais suaves entre as superfícies de contato e também um tempo de vida mais satisfatório para os componentes metálicos. Para essas superfícies de contato, são divididos em três tipos de regimes de lubrificação: hidrodinâmico, misto e limítrofe.

Figura 12: Regimes de Lubrificação

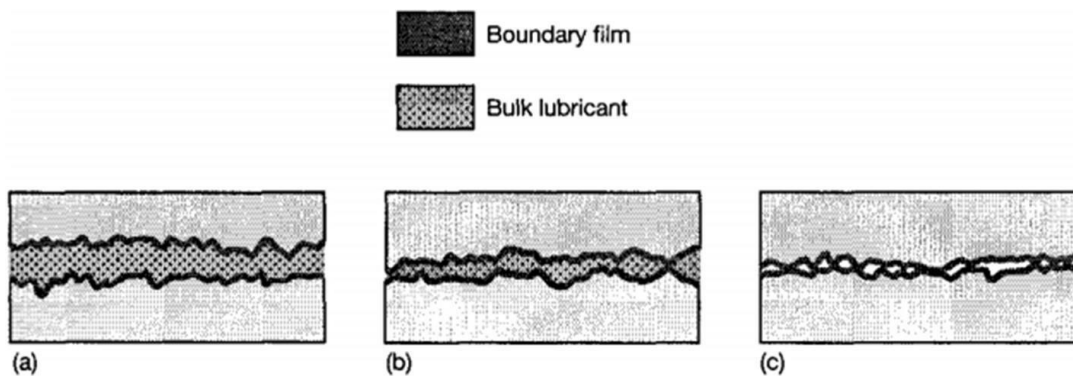


Ilustração dos regimes de lubrificação: a) Hidrodinâmico, b) Misto e c) Limítrofe.

[Adaptado: Hamrock (2004)]

Fonte: ELLWANGER. D, 2021, p. 2.

Em (a), temos o regime hidrodinâmico, que é o regime mais conhecido por ter uma formação de filme completo entre as duas superfícies de contato, ao ser exercida uma pressão sobre as mesmas. Entretanto, desde que entre essas partes, exista uma velocidade relativa entre elas. Em (b), temos o regime misto, que separa as duas superfícies de contato por intermédio de um filme contínuo de lubrificante e com uma espessura comparável às asperezas da superfície. E, por fim, em (c), temos o regime limítrofe. Nele, ocorre maior contato e maior interação entre as superfícies. O filme formado entre as superfícies não é capaz de separá-las completamente.

5.9.3. ESCARAS DE DESGASTE

Escaras de desgaste (também conhecidas como marcas de desgaste) são áreas localizadas de desgaste em uma superfície que é causada por fricção, contato ou abrasão repetitiva. Essas áreas podem se desenvolver em superfícies que estão em contato e em movimento relativo, como o contato entre dois componentes mecânicos ou o deslizamento de uma peça em relação a outra.

As escaras de desgaste podem ser facilmente identificadas como áreas localizadas onde a superfície perdeu parte do seu material original e pode apresentar uma textura diferente, como ranhuras ou irregularidades. Elas podem afetar a aparência e a funcionalidade de peças mecânicas, além de aumentar o atrito e o desgaste em outras partes do sistema.

A prevenção de escaras de desgaste pode ser alcançada através de medidas de manutenção preventiva, como lubrificação adequada, limpeza e inspeção regular das superfícies de contato. O monitoramento regular do desgaste também pode ajudar a identificar precocemente áreas de escaras de desgaste e permitir que sejam tomadas medidas corretivas antes que se tornem um problema sério.

6. COEFICIENTE DE FRICÇÃO

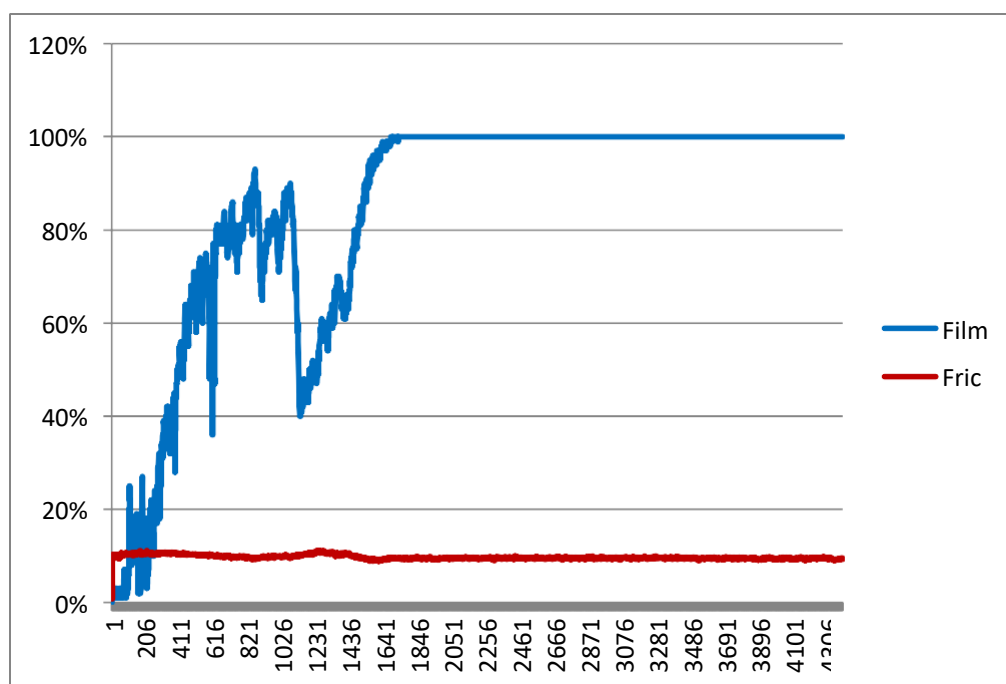
O coeficiente de atrito ou coeficiente de fricção é uma medida da resistência à fricção entre duas superfícies metálicas em que se movem em contato durante o funcionamento do motor. Essa interação é afetada por diversos fatores, incluindo a rugosidade, a pressão de contato, a temperatura e o tipo de lubrificante utilizado. Em motores alimentados por combustíveis alternativos como o biodiesel, o coeficiente de atrito pode ser afetado por diferentes características do biocombustível, como sua viscosidade e propriedades químicas que são bem diferentes das propriedades do diesel convencional.

A presença de componentes específicos no biodiesel como ácidos graxos insaturados e glicerol, pode afetar a formação de filme lubrificante nas superfícies metálicas, alterando o coeficiente de atrito e influenciando no desgaste das peças do motor. Por isso, é importante avaliar o coeficiente de atrito em motores alimentados por biodiesel para garantir o desempenho adequado e a durabilidade do sistema.

7. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os parâmetros tribológicos de coeficiente de atrito, percentual de filme lubrificante e temperatura próxima ao contato foram obtidos em função do tempo de ensaio de lubricidade na bancada HFRR, durante 1 hora e 15 minutos ou 4500 s. O resultado do experimento 1 está mostrado na **Figura 13**.

Figura 13: Gráfico do ensaio 1: Coeficiente de atrito e formação de filme em função do tempo lubrificado com o B100.



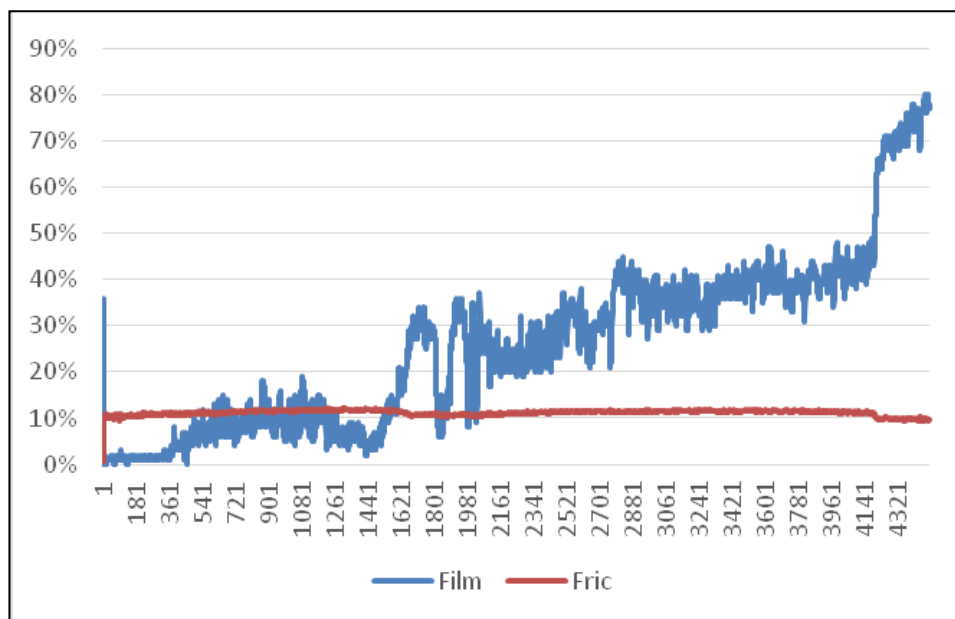
Formação de filme (%) Coeficiente de Fricção

Fonte: Autor (2022).

Para esse Experimento 1 (Figura 13), observa-se que no início do ensaio de lubricidade, até a proximadamente 1640 segundos, o percentual do filme aumenta e após esse tempo, se mantém constante até os 4500 segundos. Já o coeficiente de atrito se manteve uniforme durante todo o ensaio.

Para o Experimento 2, resultado de outro ensaio de lubricidade com a mesma amostra de biodiesel de óleo de fritura (B100), Figura 14, percebe-se uma tendência no aumento do percentual do filme embora os resultados estejam oscilando durante todo o ensaio e observa o mesmo comportamento uniforme para o coeficiente de atrito similar ao Experimento 1.

Figura 14: Gráfico do ensaio 2: Coeficiente de atrito e formação de filme em função do tempo lubrificado com o B100.



Formação de filme (%) Coeficiente de Fricção

Fonte: Autor (2022).

Os resultados dos dois experimentos (Figura 13 e 14) obtidos com a amostra de B100 apresentaram uma dispersão dos valores para a mesma amostra, assim como também, as características de desgaste cada par tribológico esfera-disco. Numa temperatura de aproximadamente 60 °C, obteve-se uma formação média de filme 55,5% e um coeficiente de fricção médio de 0,1045, no Experimento 1. Já no Experimento 2, a uma temperatura de 60°C, obteve-se uma formação de filme de 26% e um coeficiente de fricção de 0,112.

No experimento 1, obteve-se um coeficiente de atrito de 0,097 e formação de filme de 85%. O contato uniforme da amostra de biodiesel de óleo residual se iniciou depois dos 1700s. Pelo fato do coeficiente de fricção ter sido menor e ter uma formação de filme considerável, de mais de 80%, o desgaste do contato esfera-disco ocorrido durante a realização do experimento foi menor.

Dessa forma, pelos resultados apresentados nas Figuras 13 e 14, que no **Experimento 2**, o contato da amostra do biodiesel com o par metálico se manteve instável durante os 4500 segundos. Entretanto, o coeficiente de fricção foi um pouco maior e teve menor percentual de formação de filme se comparado ao **Experimento 1**. Assim sendo, houve maior desgaste.

A redução do coeficiente de atrito e a formação adequada de filme lubrificante são fundamentais para minimizar o desgaste das peças metálicas em motores, especialmente em aplicações de alta carga e temperatura. O uso de lubrificantes de alta qualidade e a escolha do tipo de lubrificante mais adequado para cada aplicação são fatores críticos para garantir a eficiência e a confiabilidade desses sistemas (Adaptado de S. Sapsanis, et al., "A review on the effects of biodiesel on the lubrication of diesel engines", 2020).

O modo de armazenamento do par metálico é importante para evitar danos e corrosão.

Antes da realização dos Experimentos 1 e 2, após realizado o polimento das peças, estas foram guardadas envolvidas em algodão e fita crepe, e isso de certa forma evitou que elas interagissem com o meio externo e ocasionasse a corrosão em sua superfície.

De certa forma, o algodão pode ter ajudado a evitar o desgaste das peças devido à sua capacidade de absorver umidade e manter as superfícies secas e livres de água, que é um fator importante na corrosão. Além disso, o algodão pode ter ajudado a evitar o contato direto entre as peças, o que reduziria a probabilidade de desgaste por atrito entre elas.

A fita, por sua vez, pode ter ajudado a manter as peças firmemente envolvidas em algodão, evitando que elas se movam ou vibrem e sofram desgaste mecânico. Além disso, a fita pode ter impedido a entrada de umidade e oxigênio, que são fatores que contribuem para a corrosão.

Em resumo, a combinação de algodão e fita pode ter ajudado a proteger as superfícies das peças contra a corrosão e o desgaste, proporcionando um ambiente seco e isolado para as peças.

Antes da realização dos ensaios e 4 e 5, as amostras foram polidas novamente e foram armazenadas em um recipiente contendo glicerina. Logo após, pensávamos que ainda iria permanecer o resultado do polimento. Porém, ocorreu o contrário do esperado, elas não apresentaram um aspecto reluzente, polido e espelhado (Figura 15 a), mas sim, uma superfície escura e opaca (Figura 15 c).

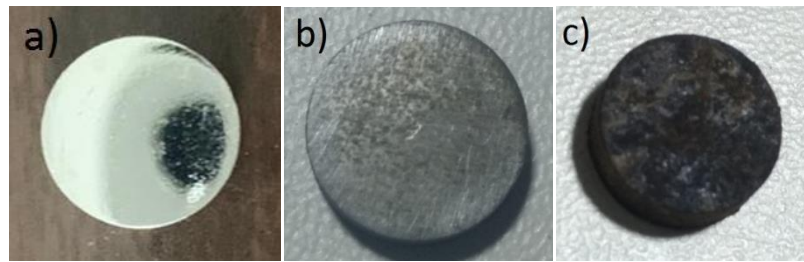
A glicerina é um líquido viscoso e pegajoso que pode reter partículas e contaminantes na superfície das amostras, o que pode causar uma aparência opaca e interferir na medição dos parâmetros tribológicos, como o coeficiente de atrito e formação de filme. Além disso, a glicerina pode oxidar ou corroer as amostras se elas forem deixadas em contato com o líquido por um período prolongado de tempo. Nesse sentido, pode ter causado essa aparência escura e opaca na superfície das amostras.

Outro fator importante é a reutilização das peças nos outros ensaios de desgaste. O desgaste é um processo natural que ocorre em superfícies metálicas quando há atrito e/ou contato entre elas. Mesmo quando o aço não está sendo usado ativamente em uma aplicação específica, ele pode se desgastar naturalmente devido a vários fatores, como oxidação, corrosão, fadiga do material e desgaste por abrasão.

A oxidação e corrosão podem ocorrer devido à exposição do aço a elementos como ar, umidade e substâncias corrosivas, resultando na formação de camadas de óxidos e produtos de corrosão que podem afetar a integridade da superfície e levar à perda de material.

A fadiga do material ocorre quando o aço é submetido a tensões cíclicas ou repetitivas, como vibrações ou cargas alternadas, resultando em rachaduras e fraturas que podem se propagar na superfície do material. Finalmente, o desgaste por abrasão pode ocorrer quando partículas duras ou outras superfícies ásperas entram em contato com a superfície do aço, removendo material e causando desgaste. Dessa forma, o polimento dos pares discos/ esferas foi realizado, assim que se percebeu algum indício de desgaste, nas amostras metálicas analisadas. A **Figura 15** demonstra os aspectos das superfícies do disco com a utilização nos experimentos.

Figura 15: Aspectos das superfícies do disco metálico.



Fonte: Autor (2023).

Em (a), temos o disco com sua superfície reluzente e espelhada após o processo do polimento. Em (b) temos o disco oxidado depois de interagir com os agentes externos. Por fim, o disco com sua superfície bem escura e opaca, processo ocasionado pelo armazenamento na glicerina, representado em (c).

Em resumo, o aço pode se desgastar naturalmente, mesmo sem estar em uso ativo, devido a vários fatores supracitados, que afetam a integridade da superfície e a estrutura do material.

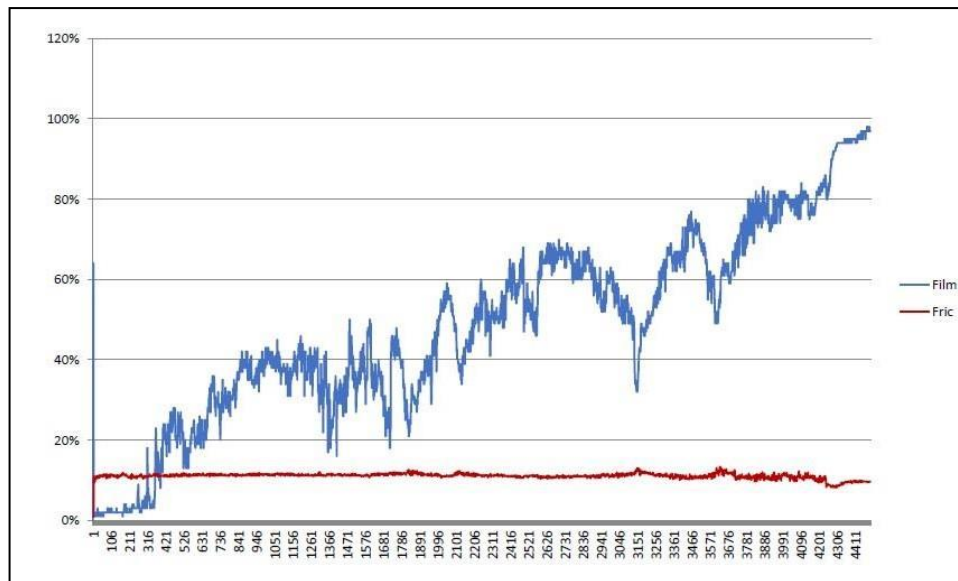
Em um ensaio tribométrico entre um par esfera-disco interagindo com biodiesel de óleo de fritura como óleo lubrificante, vários tipos de desgaste podem ocorrer, dependendo das condições do ensaio e das propriedades dos materiais envolvidos.

O desgaste por abrasão pode ocorrer quando as partículas duras no biodiesel ou em outros contaminantes presentes entram em contato com a superfície do disco ou da esfera, removendo material e causando desgaste.

O desgaste por adesão também pode ocorrer quando as superfícies do disco e da esfera entram em contato e aderem uma à outra devido à pressão e ao calor gerados durante o ensaio tribométrico. Além disso, o desgaste por fadiga do material pode ocorrer se o material do disco ou da esfera estiver sujeito a tensões cíclicas ou repetitivas durante o ensaio.

O tipo de desgaste mais comum em um ensaio tribométrico, no entanto, é o desgaste por abrasão, especialmente em condições em que partículas duras ou outros contaminantes estão presentes no óleo lubrificante. Para minimizar esse tipo de desgaste, é importante escolher um óleo lubrificante adequado e garantir que as amostras estejam limpas e livres de contaminantes antes de iniciar o ensaio.

Figura 16: Gráfico do ensaio 3: Coeficiente de atrito e formação de filme em função do tempo lubrificado com o B100.

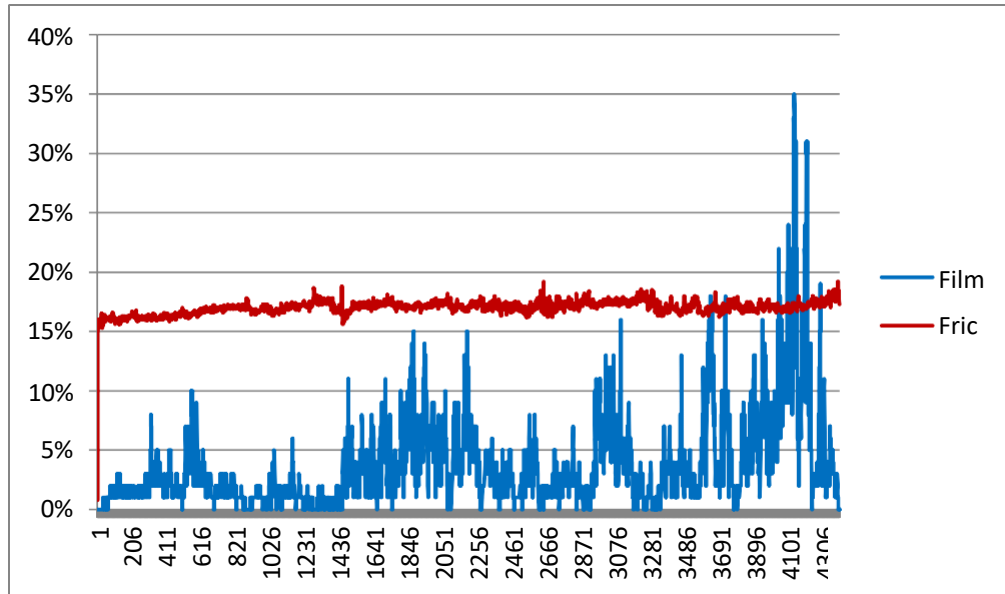


Formação de filme (%) Coeficiente de Fricção

Fonte: Autor (2022).

O resultado do **Experimento 3**, Figura 16, se mostrou similar ao **Experimento 1** em relação ao aumento do percentual do filme com a evolução do tempo de ensaio e com o comportamento estável do coeficiente de fricção.

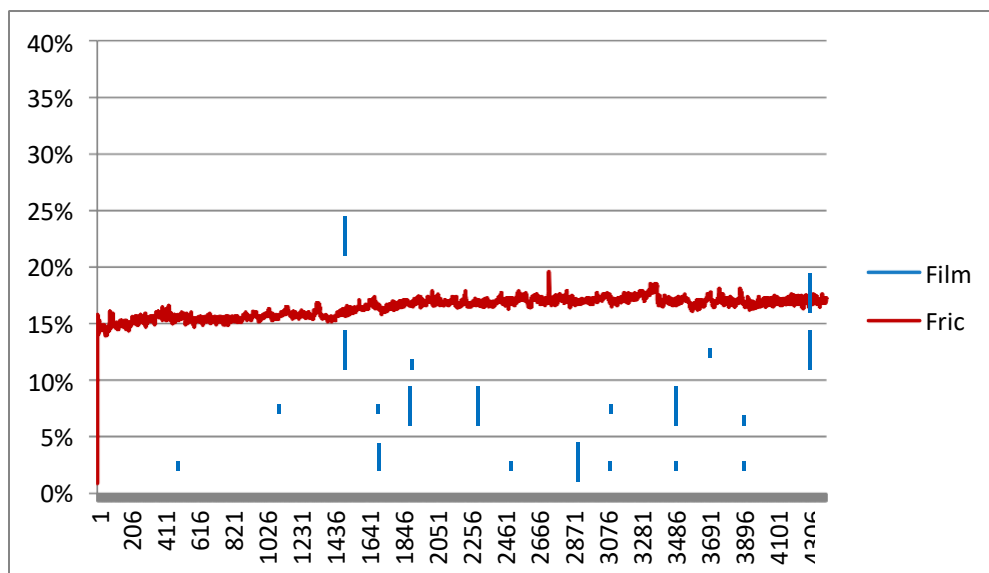
Figura 17: Gráfico do ensaio 4: Coeficiente de atrito e formação de filme em função do tempo lubrificado com o B100.



Formação de filme (%) Coeficiente de Fricção

Fonte: Autor (2023).

Figura 18: Gráfico do ensaio 5: Coeficiente de atrito e formação de filme em função do tempo lubrificado com o B100.



Formação de filme (%) Coeficiente de Fricção

Fonte: Autor (2023).

Os resultados dos Experimentos 4 e 5, Figuras 17 e 18, que também são as replicatas dos ensaios de lubricidade para a mesma amostra B100, observa-se comportamentos similares para os dois parâmetros tribológicos analisados durante o tempo de ensaio, entretanto com valores de coeficiente de atrito e porcentagem de filme diferentes (Tabela 4).

Tabela 4: Resultados de coeficiente de atrito e formação de filme em função do tempo lubrificado com o B100 obtido de óleo residual obtidos após os 5 experimentos realizados no HFRR.

Temperatura (°C)	Coeficiente de atrito	Formação de filme (%)
59,9	0,097	85
59,9	0,112	26
59,9	0,111	48
59,9	0,170	4
59,9	0,165	8

Fonte: Autor (2023).

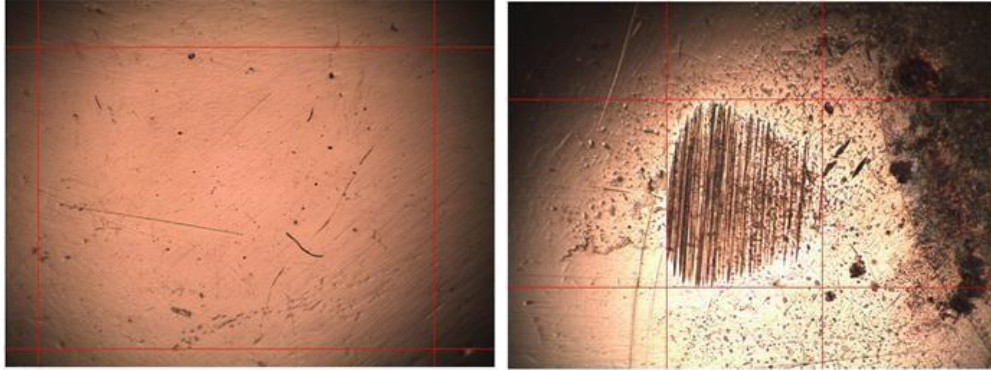
A Tabela 4 mostra os resultados dos parâmetros tribológicos dos 5 experimentos, da mesma amostra de biodiesel e nas mesmas condições de ensaios, observa-se um desempenho insatisfatório na repetibilidade dos resultados obtidos, não sendo assim possível obtermos uma relação eficiente e segura com a propriedade de lubricidade do biodiesel analisado.

7.1. RESULTADO DA ANÁLISE DO DESGASTE OCACIONADO NA SUPERFÍCIE DAS ESFERAS

Objetivando avaliar o desgaste do contato pino-disco após a realização do ensaio na bancada de HFRR, analisou-se a escara de desgaste do disco por meio das imagens de microscopia, as imagens estão apresentadas nas figuras abaixo:

Experimento 1

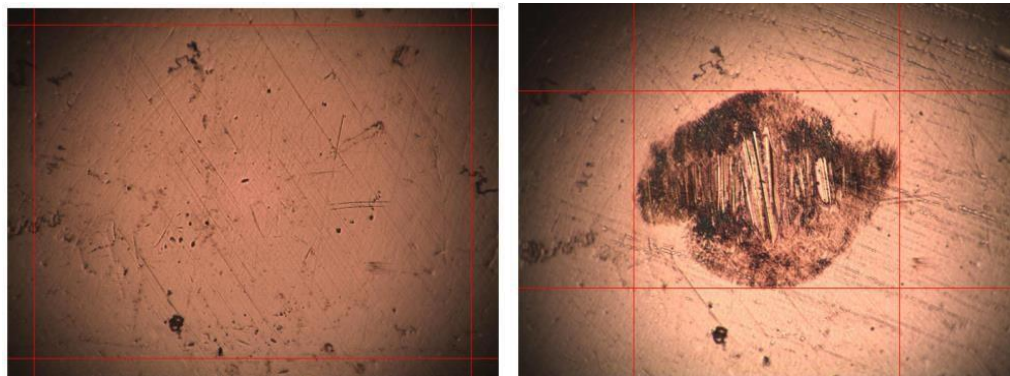
Figura 19: Imagens das superfícies de contato das esferas, antes a após o primeiro ensaio no HFRR.



Fonte: Autor (2022).

Experimento 2

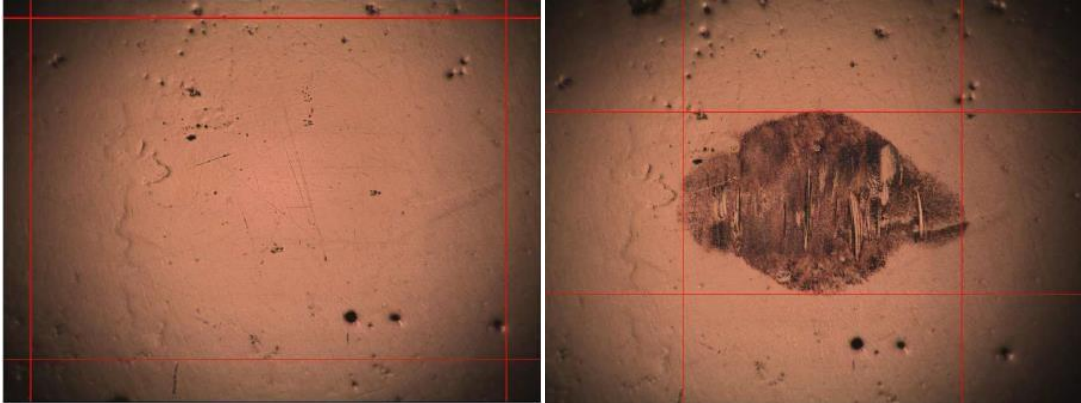
Figura 20: Imagens das superfícies de contato das esferas, antes a após o segundo ensaio no HFRR.



Fonte: Autor (2022).

Experimento 3

Figura 21: Imagens das superfícies de contato das esferas, antes e após o terceiro ensaio no HFRR.



Fonte: Autor (2023).

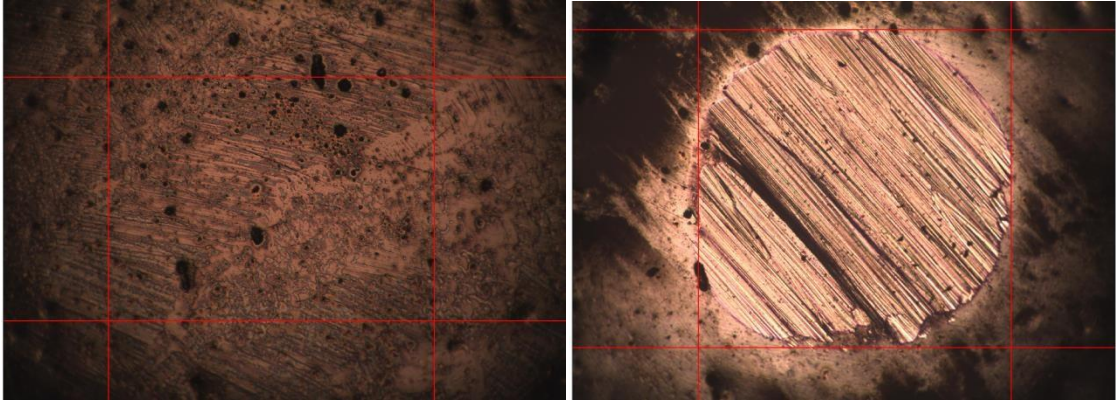
O coeficiente de atrito é uma medida da resistência ao movimento entre duas superfícies em contato. O tamanho e profundidade das escaras de desgaste em uma esfera de aço são influenciados pelo coeficiente de atrito e outros fatores, como a dureza da superfície e a pressão de contato.

Se o coeficiente de atrito entre a esfera de aço e a superfície com a qual está em contato for alto, isso significa que haverá mais fricção e desgaste na superfície da esfera. Isso pode levar a escaras de desgaste maiores e mais profundas. Além disso, se a pressão de contato for alta, também pode aumentar a profundidade das escaras de desgaste.

No entanto, é importante notar que o tamanho e profundidade das escaras de desgaste não dependem exclusivamente do coeficiente de atrito. Outros fatores, como a dureza da superfície, a geometria da esfera e a quantidade de carga exercida na esfera, também desempenham um papel importante na determinação do desgaste da superfície.

Experimento 4

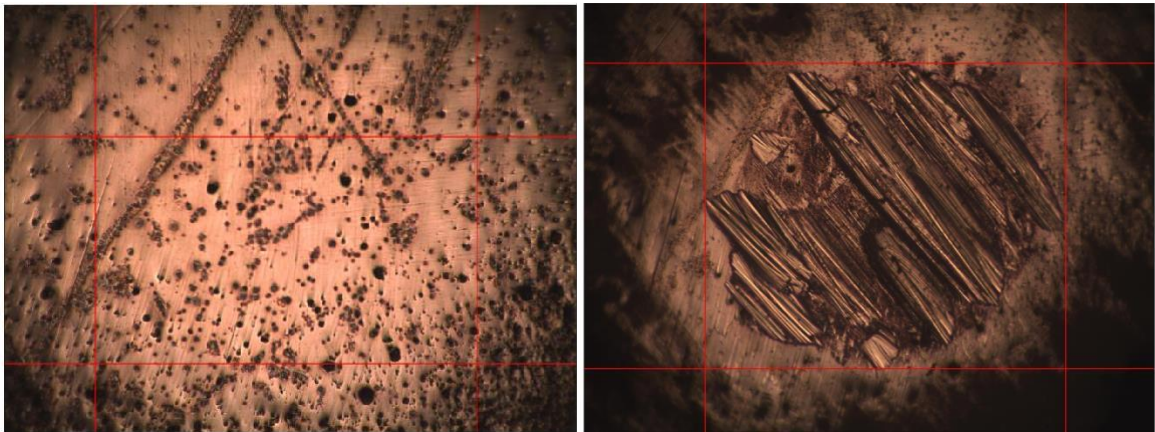
Figura 22: Imagens das superfícies de contato das esferas, antes a após o quarto ensaio no HFRR.



Fonte: Autor (2023).

Experimento 5

Figura 23: Imagens das superfícies de contato das esferas, antes a após o quinto ensaio no HFRR.



Fonte: Autor (2023).

Tabela 5: Resultados do tamanho das escaras ocasionadas na superfície das esferas durante os cinco ensaios realizados no HFRR

Experimento	Eixo X	Eixo Y	Média de Desgaste
1	321 μm	387 μm	354 μm
2	536 μm	398 μm	467 μm
3	517 μm	337 μm	427 μm
4	578 μm	586 μm	582 μm
5	634 μm	535 μm	584,5 μm

Fonte: Autor (2023).

Analisando o aspecto das escaras representadas nas figuras 19, 20 e 21, das superfícies dos três primeiros experimentos, observa-se que ambas as amostras apresentaram profundidade de desgaste após os ensaios, com tamanho de escaras similares, com diâmetro médio de escara de 354 micrometros. E assim, é possível entender que o coeficiente de atrito e o desgaste se correlacionam diretamente.

Já nos ensaios 4 e 5, representados nas figuras 22 e 23, as esferas apresentaram escaras com desgaste com diâmetro médio de 583 micrômetros. Com base nas informações fornecidas, é possível que o maior desgaste nas esferas nos ensaios 4 e 5 tenha sido causado pela menor formação de filme lubrificante entre as esferas e os discos, resultando em maior atrito e desgaste. O coeficiente de fricção mais elevado nos experimentos 4 e 5 sugere que o biodiesel (B100) pode não ter sido tão eficaz na redução do atrito e desgaste como nos ensaios anteriores.

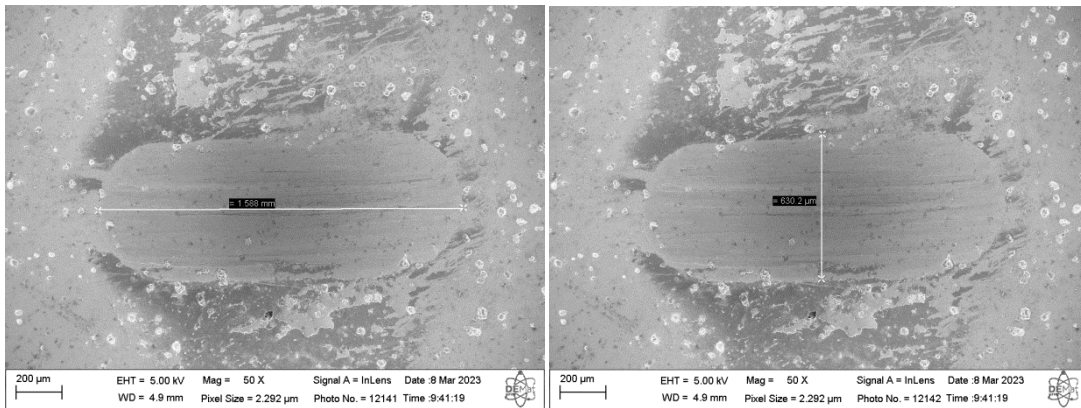
Além disso, o armazenamento das amostras na glicerina pode ter contribuído para a corrosão das superfícies das esferas, o que poderia ter aumentado a rugosidade e abrasão das superfícies e, conseqüentemente, o desgaste durante os ensaios tribológicos.

Outro fator que pode ter influenciado o desgaste nas esferas é a pressão de contato e a carga aplicada durante os ensaios. Uma pressão de contato mais elevada pode aumentar o atrito e o desgaste, especialmente se o lubrificante não for suficientemente eficaz para reduzir o atrito. Portanto, é importante avaliar cuidadosamente todas as variáveis que podem afetar os resultados dos ensaios tribológicos.

7.2. ANÁLISE DE DESGASTE POR MEV.

Após o ensaio tribológico, avaliou-se a escara de desgaste na superfície do disco. Tal medida foi obtida por meio da análise das dimensões da área desgastada através do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). As imagens mostradas na figura 24 apresentam as medidas do tamanho das escaras ocasionadas na superfície do disco após os experimentos 4 e 5.

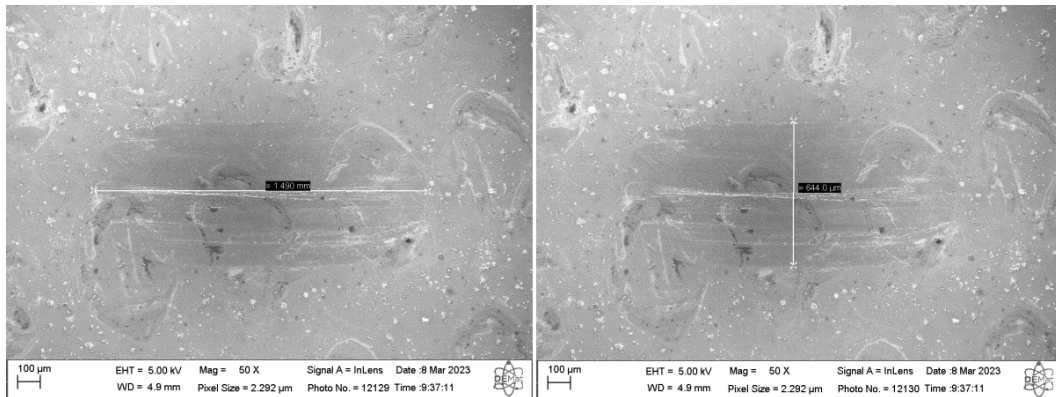
Figura 24: Avaliação das imagens das medidas do tamanho das escaras ocasionadas na superfície do disco após o experimento 4, analisadas no MEV.



Fonte: Autor (2023).

No caso específico em questão, a escara de desgaste apresentou uma largura de 1,588mm e uma altura de 0,63mm. Essas medidas indicam o tamanho da área desgastada na superfície do disco (área do deslizamento), que pode ser comparada com os valores de referência para avaliar o desgaste e a durabilidade do material.

Figura 25: Avaliação das imagens das medidas do tamanho das escaras ocasionadas na superfície do disco após o experimento 5, analisadas no MEV.



Fonte: Autor (2023).

No disco empregado no **Experimento 5**, as medidas das escaras da zona de deslizamento na superfície do disco foram de 1,490 mm de largura e a altura de 0,644 mm.

Figura 26: representação do desgaste da zona de contato do disco com a esfera após o experimento 4 no HFRR.

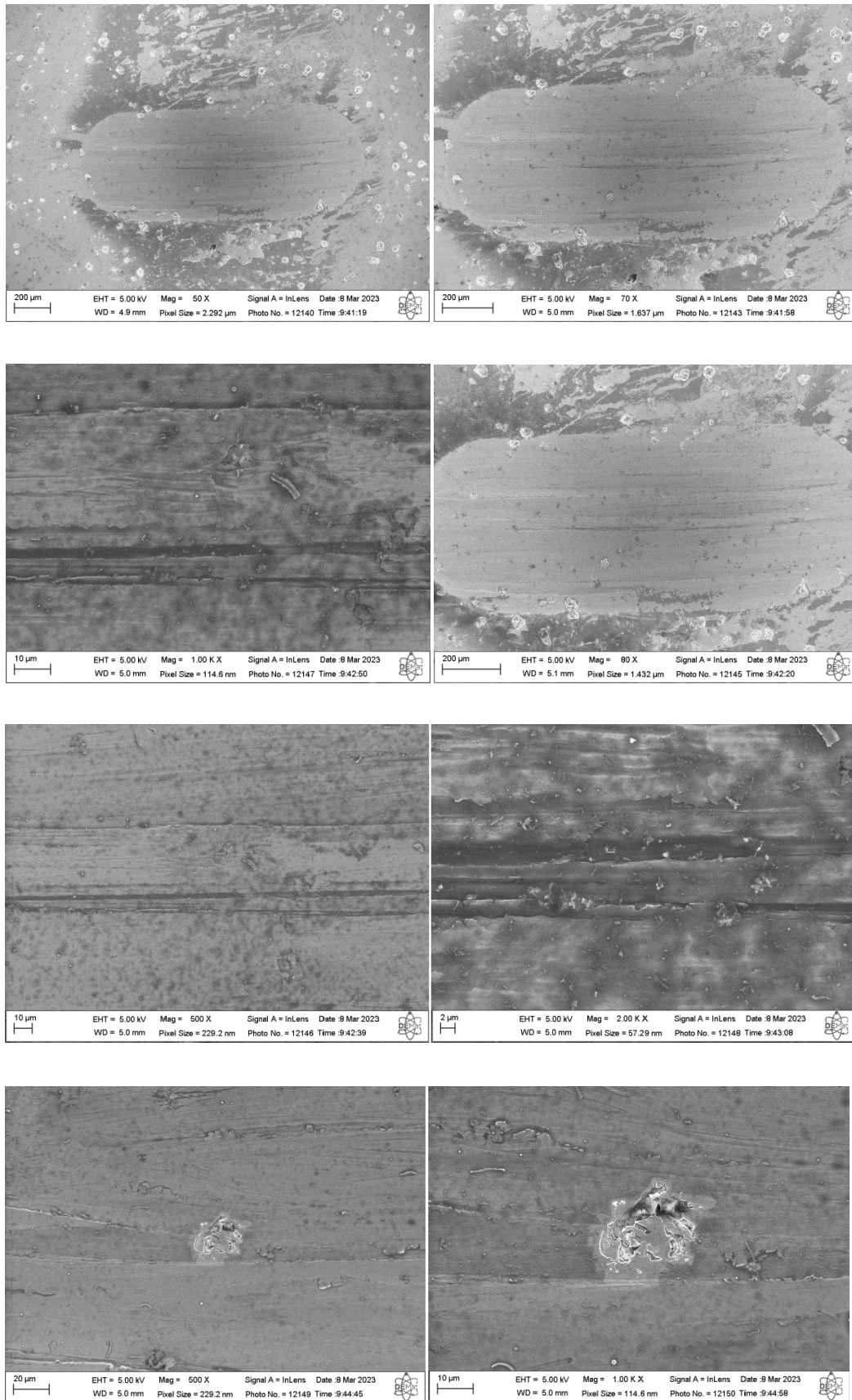
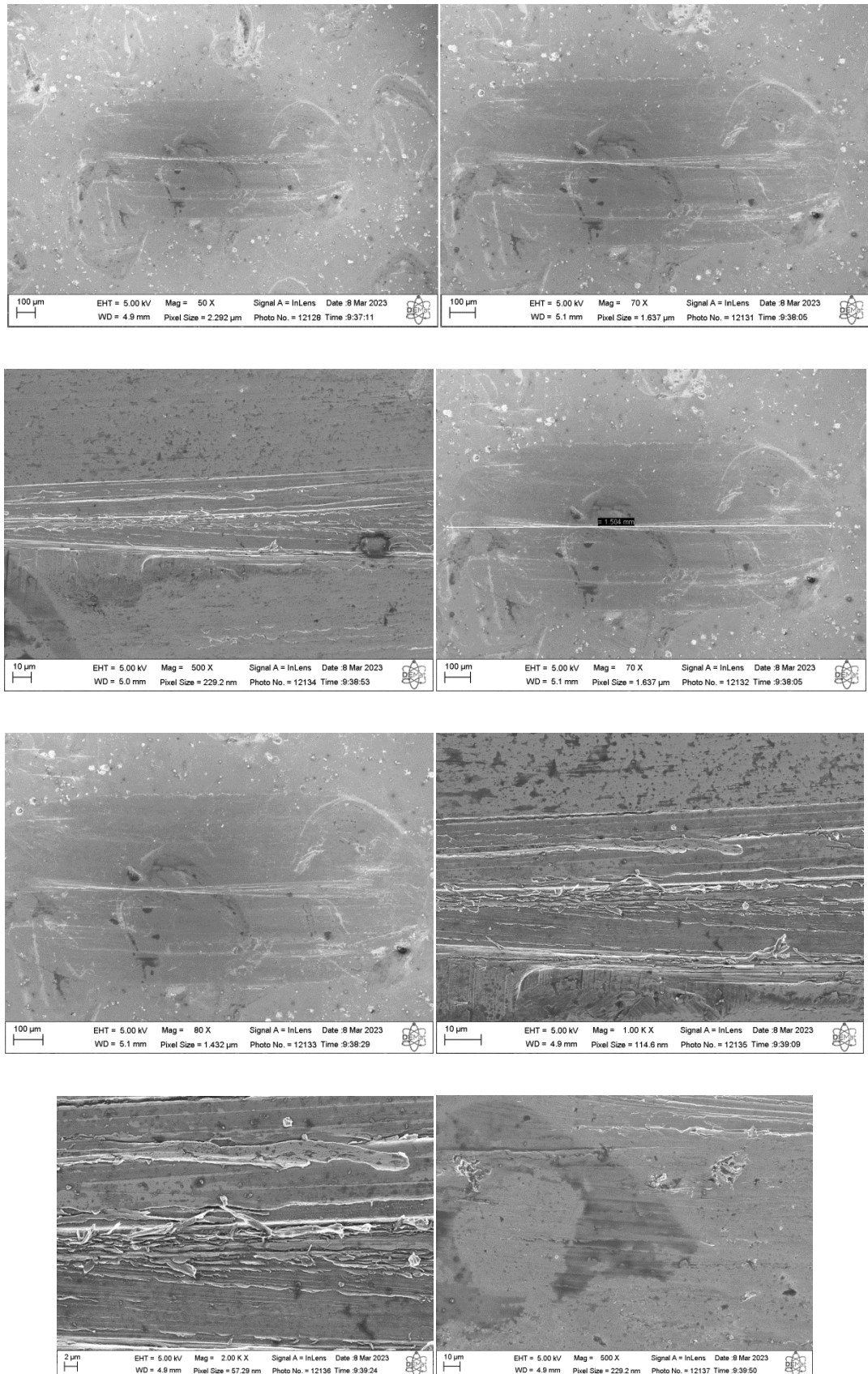


Figura 27: representação do desgaste da zona de contato do disco com a esfera após o experimento 5 no HFRR.



A largura da escara de desgaste indica a extensão da área desgastada, enquanto a altura fornece informações sobre a profundidade do desgaste. Com base nesses resultados, pode-se inferir que a largura da escara de desgaste no primeiro caso é maior do que no segundo caso, indicando um desgaste mais acentuado na superfície do disco. Entretanto, a altura da escara de desgaste é maior no segundo caso, indicando que o desgaste foi mais profundo. Em ambos os Experimentos, os desgastes pode ter ocorrido predominantemente pelo abrasão por sulcamento após os 225 000 ciclos de contato do disco com a esfera no ensaio.

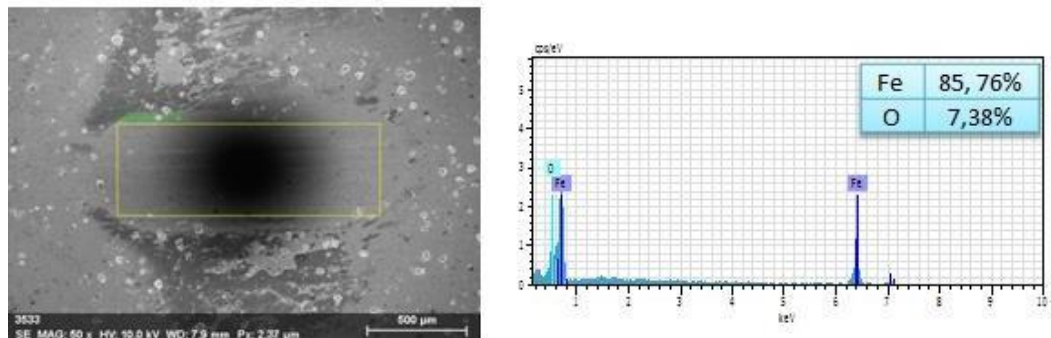
As imagens apresentadas nas Figuras 26 e 27, mostram ampliações nas zonas de contato dos discos dos Experimentos 4 e 5, onde se observa mais detalhes da morfologia das escaras formadas em ambas as superfícies.

7.3. ANÁLISE DE DESGASTE POR EDS

As Figuras 28, 29 e 30 mostram os resultados das três análises no EDS em diferentes regiões do disco, dentro e fora da zona de desgaste após a realização do **Experimento 4** no HFRR:

Figura 28: Análise 1 no EDS após a realização do **Experimento 4** no HFRR.

Aspectos topográficos e composicionais dentro da zona de desgaste.

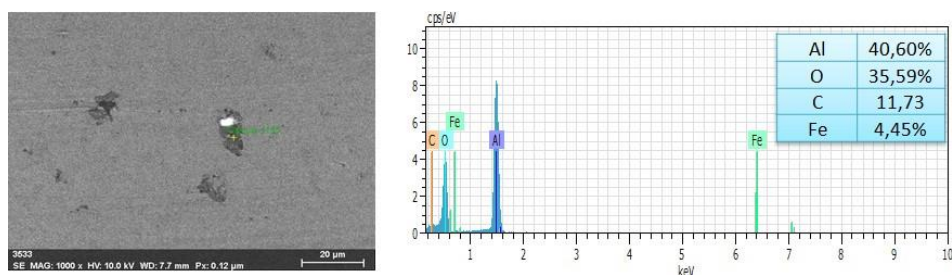


Fonte: Autor (2023)

Na Figura 28, observa-se uma mancha escura de formato esférico e a presença dos elementos ferro e oxigênio na zona desgastada. A maior porcentagem é de Fe. 85,76%, em função da composição do aço do disco SAE 1045 e a quantidade de oxigênio encontrado, 7,38%, o que pode estar relacionado a formação de óxido ou no processo de usinagem do disco.

Figura 29: Análise 2 no EDS após a realização do **Experimento 4** no HFRR

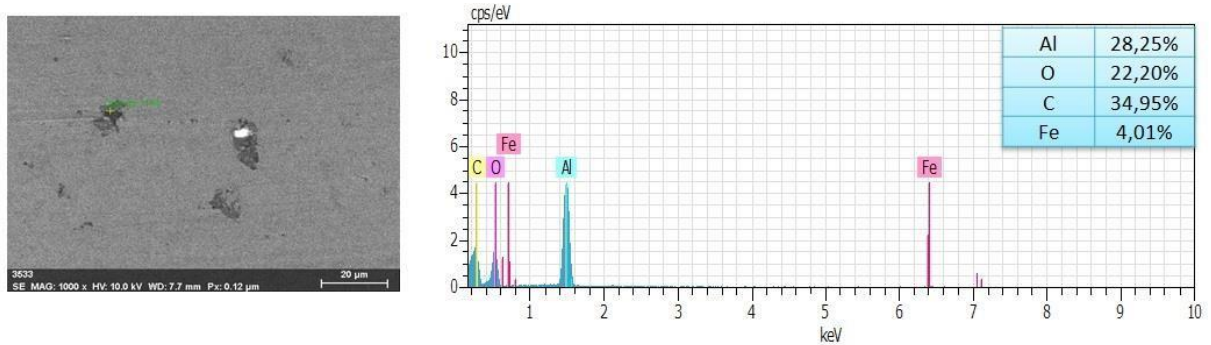
Aspectos topográficos e composicionais fora da zona de desgaste.



Fonte: Autor (2023).

Figura 30: Análise 3 no EDS após a realização do **Experimento 4** no HFRR.

Aspectos topográficos e composicionais fora da zona de desgaste.



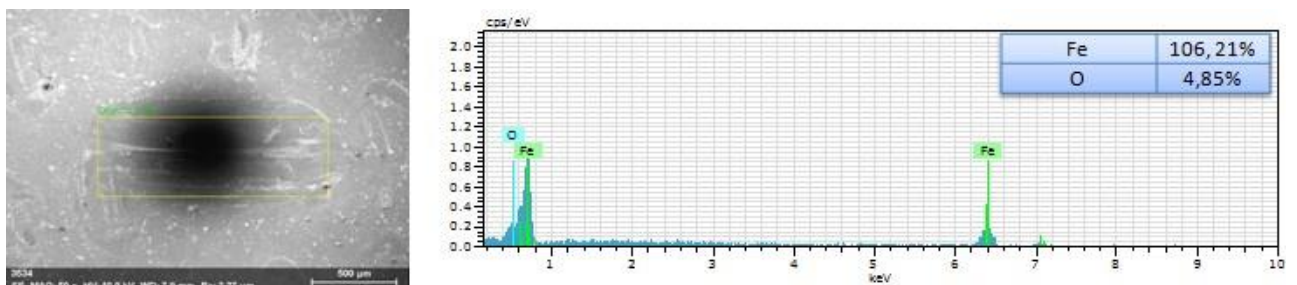
Fonte: Autor (2023).

Nas Figuras 29 e 30, fora da zona de desgaste observa a presença de uma maior porcentagem dos elementos alumínio e oxigênio, que pode estar associado com o processo de oxidação do material ou ao processo de obtenção do disco ou qualquer outro tipo de contaminação. Já a presença de ferro e carbono é em função da composição do aço.

As Figuras 31, 32 e 33 mostram os resultados das três análises no EDS, em diferentes regiões do disco, dentro e fora da zona de desgaste, após a realização do Experimento 5 no HFRR.

Figura 31: Análise 1 no EDS após a realização do **Experimento 5** no HFRR

Aspectos topográficos e composicionais dentro da zona de desgaste.

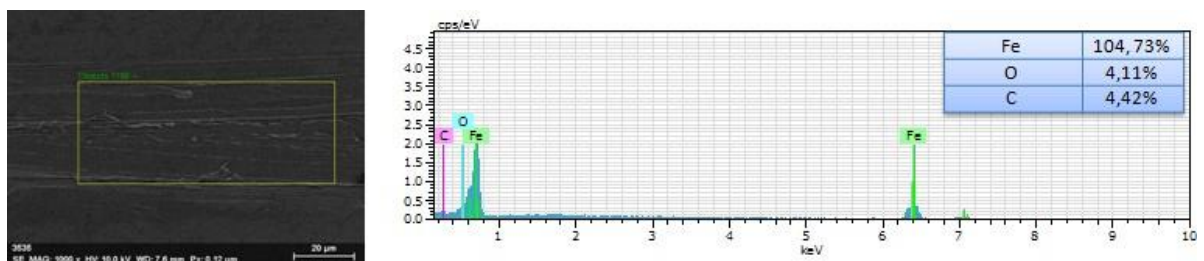


Fonte: Autor (2023).

Na Figura 31, observa-se também uma macha escura de formato esférico e a presença dos elementos ferro e oxigênio na zona desgastada com aspecto topográfico e composicional similar ao **Experimento 4**. Neste caso, maior porcentagem é de Fe, 95,63%, em função da composição do aço do disco SAE 1045 e a quantidade de oxigênio encontrado, 4,37%, o que pode estar relacionado a formação de óxido ou no processo de usinagem do disco.

Figura 32: Análise 2 no EDS após a realização do **Experimento 5** no HFRR

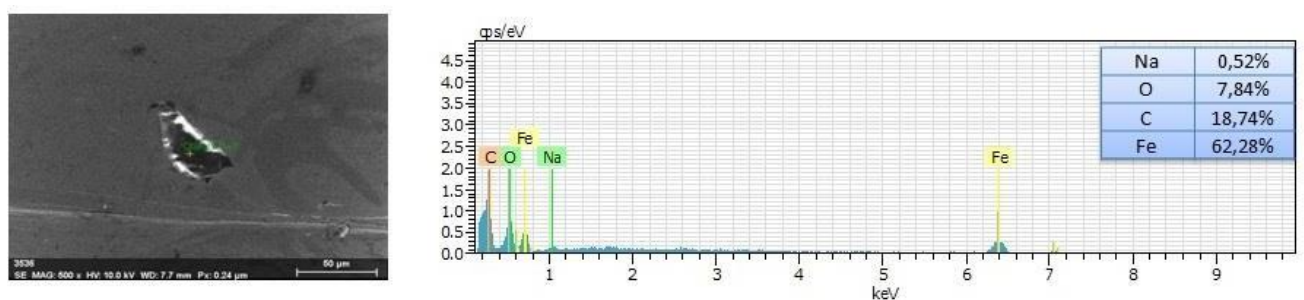
Aspectos topográficos e composicionais fora da zona de desgaste.



Fonte: Autor (2023).

Figura 33: Análise 3 no EDS após a realização do **Experimento 5** no HFRR

Aspectos topográficos e composicionais fora da zona de desgaste.



Fonte: Autor (2023).

Nas Figuras de 32 e 33, fora da zona de desgaste observa a presença, predominantemente, de Ferro e Carbono, ambos presentes na composição do aço e traços do elemento sódio, apenas na imagem da Figura 33.

A quantidade de ferro presente nas amostras varia significativamente entre as três análises realizadas, o que pode indicar diferentes processos de fabricação ou alterações na composição ao longo do tempo.

A presença de oxigênio na análise 3 (Figura 30) pode ser explicada pela oxidação do material devido à exposição ao ar ou à presença de impurezas contendo oxigênio. A presença de sódio também foi observada na análise 3 (Figura 33), o que pode ser explicado pela contaminação da amostra durante a preparação ou análise.

Em síntese, os resultados indicaram que as amostras analisadas são principalmente compostas de ferro, com a presença variável de carbono e oxigênio. No entanto, é importante ressaltar que esses resultados e informações se aplicam apenas às amostras específicas selecionadas para serem analisadas, que não necessariamente se estendem a outras amostras e não podem ser generalizadas para outras amostras sem uma análise cuidadosa.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nas análises realizadas, é possível concluir que o coeficiente de atrito e o desgaste estão diretamente relacionados. Além disso, observou-se que o biodiesel (B100) pode não ter sido tão eficaz na redução do atrito e desgaste como nos ensaios anteriores, o que pode ser atribuído à menor formação de filme lubrificante entre as esferas e os discos.

Outros fatores que podem ter influenciado o desgaste das esferas incluem a pressão de contato e a carga aplicada durante os ensaios e o armazenamento das amostras na glicerina, que pode ter contribuído para a corrosão das superfícies das esferas. É importante destacar que todas essas variáveis devem ser cuidadosamente avaliadas para garantir resultados precisos e confiáveis em ensaios tribológicos.

Com base na análise realizada das dimensões da escara de desgaste em dois casos diferentes, pode-se inferir que as diferenças encontradas nos resultados estão relacionadas a diferentes condições experimentais, como a carga, a velocidade e o tipo de lubrificante utilizado nos testes.

As informações obtidas a partir dessa análise são relevantes para avaliar o desempenho dos materiais em condições tribológicas específicas e contribuir para o desenvolvimento de materiais mais resistentes e duráveis. Além disso, a análise por meio do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) fornece informações detalhadas sobre os mecanismos de desgaste envolvidos no processo, o que pode ser útil para o desenvolvimento de estratégias de mitigação do desgaste.

Esses resultados são importantes para entender a composição química das amostras analisadas e as possíveis variações na sua fabricação ou composição ao longo do tempo. A presença de ferro como o elemento químico predominante indica que o material é provavelmente uma liga de ferro, enquanto a presença variável de carbono e oxigênio pode ser explicada por diferentes processos de fabricação ou por contaminação durante a preparação ou análise da amostra.

Portanto, é essencial levar em consideração todos esses fatores ao interpretar os resultados e discutir as implicações dos ensaios tribológicos, a fim de evitar conclusões equivocadas e tomar decisões informadas em relação à seleção de materiais e lubrificantes. Além disso, é de extrema importância considerar esses aspectos ao interpretar os resultados e discutir as implicações dos ensaios tribológicos. Compreender os mecanismos de desgaste envolvidos em diferentes condições tribológicas pode contribuir significativamente para a seleção adequada de materiais e lubrificantes, bem como para o desenvolvimento de materiais mais resistentes e duráveis sob condições específicas. Por fim, ressaltar que os resultados se referem apenas às amostras analisadas e que outras amostras podem apresentar variações significativas na sua composição química. Contudo, é necessário realizar análises cuidadosas para avaliar a composição química de outras amostras e entender como isso pode afetar seu desempenho em condições específicas. Ademais, é fundamental utilizar técnicas analíticas adequadas para obter resultados precisos e confiáveis.

REFERÊNCIAS

- Almeida, R. (2020). **A importância da análise tribológica na compreensão dos mecanismos de desgaste e atrito em sistemas de contato entre superfícies.** Revista de Engenharia, 25(2), 15-24.
- BARBOSA, Ronald Leite et al. **Desempenho comparativo de um motor de ciclo diesel utilizando diesel e misturas de biodiesel.** Ciência e Agrotecnologia, v. 32, p. 1588-1593, 2008.
- BOTELHO, C.A.V.A. **Viabilidade técnica e aspectos ambientais do biodiesel etílico de óleos residuais de fritura.** 2012. 121f. Dissertação (mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.
- BRIEU, T.P.; **Programa nacional de produção e uso de biodiesel: um balanço da primeira fase até 2008.** 2009. 163 f. Programa de Pós-Graduação (Pós-Graduação em energia-IEE, EP, IF, FEA), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.
- CONSTANTINE, D.A.; WANG, Y; TERRELL, E.J. **Effect of reciprocation frequency on friction and wear of vibrating contacts lubricated with soybean-based B100 biodiesel.** Tribology Letters, v. 50, 2013, pp. 279–285.
- ENCARNAÇÃO, Ana Paula Gama. **Geração de biodiesel pelos processos de transesterificação e hidroesterificação, uma avaliação econômica.** Rio de Janeiro-RJ, Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, 2008.
- ELLWANGER. D. **Análise de desempenho tribológico de lubrificantes automotivos em ensaio de escorregamento metal-metal** [monografia]. Porto Alegre: Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2021.
- FARIAS, A.C.M. **Análise da lubricidade do biodiesel brasileiro de ésteres etílicos de soja e girassol** [dissertação de mestrado]. Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte; 2011.
- FAZAL, M.A.; HASEEB, A.S.M.A.; MASJUKI, H.H. **Comparative corrosive characteristics of petroleum diesel and palm biodiesel for automotive materials.** Fuel Processing Technology. v. 91, 2010.

FAZAL, M.A.; HASEEB, A.S.M.A.; MASJUKI, H.H. **Investigation of friction and wear characteristics of palm biodiesel**. Energy Conversion and Management, v. 67, p.251–256, 2013b.

GARCIA, Camila Martins et al. **Transesterificação de óleos vegetais**. 2006.

Hamrock, B. J.; Schmid, S. R.; Jacobson, B. O. “**Fundamentals of Fluid Film Lubrication**”. 2ª Edição. New York: Marcel Dekker, 2004.

MATOS, L. A. C. **Estudo da corrosão de ligas ferrosas em diesel e biodiesel** [dissertação]. Guarapuava: Universidade Estadual do Centro Oeste, 2013.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Sobre o biodiesel. Disponível em <
<http://antigo.mme.gov.br/web/guest/secretarias/petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis/acoes-e-programas/programas/biodiesel#:~:text=O%20biodiesel%20%C3%A9%20um%20combust%C3%ADvel,usadas%20para%20produzir%20o%20biodiesel> > Acesso em 23 de junho de 2022.

Os impactos da má qualidade do óleo diesel brasileiro. – Brasília : CNT, 2012.

POSSIDONIO, E. R. **Otimização das condições de síntese de biodiesel de óleo de soja, visando atender normas de qualidade da ANP**. Fundação de Estudos e Pesquisas Agrícolas e Florestais, 33f.,2008.

Rostek, E., Babiak, M., Wróblewski, E. “**The influence of oil pressure in the engine lubrication system on friction losses**”, Elsevier Ltd, Poland, 2017.

ROSSI, G. Z.; BORGES, I. R. et al. **Análise Técnica da Produção de biodiesel a partir de óleo de Fritura Residual**. Centro universitário FEI, São Bernardo do Campo, São Paulo, 2018.

SANTOS, L. (2021). **Contribuição da análise tribológica para o desenvolvimento de novos lubrificantes com melhores propriedades de desempenho**. Revista de Engenharia Industrial, 15(1), 30-38.

SAPSANIS, S. et al. **A review on the effects of biodiesel on the lubrication of diesel engines.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 120, p. 109670, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109670>.

SILVA, T. Q. **Purificação do óleo de fritura com absorventes naturais para a produção de biodiesel.** [monografia]. Natal: Curso de ciência e tecnologia da Universidade do Estado do Rio Grande do Norte, 2018.

SLUSZZ, T.; **Características das potenciais culturas matérias-primas do biodiesel e sua adoção pela agricultura familiar** [dissertação]. Rio Grande do Sul: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006.

SORANSO, Ana M. et al. Desempenho dinâmico de um trator agrícola utilizando biodiesel destilado de óleo residual. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 12, p. 553-559, 2008.