

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

MARCUS VINÍCIUS SOUSA DOS SANTOS

AVALIAÇÃO TRIBOLÓGICA DO BIODIESEL DERIVADO DO SEBO BOVINO

NATAL/RN

2023

MARCUS VINÍCIUS SOUSA DOS SANTOS

AVALIAÇÃO TRIBOLÓGICA DO BIODIESEL DERIVADO DO SEBO BOVINO

Monografia apresentada à Universidade do Estado do Rio Grande do Norte - UERN - como requisito obrigatório para obtenção do título de Bacharelado em Ciência e Tecnologia.

Orientador (a): Prof Dr. Lília 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.

S237a Santos, Marcus Vinícius Sousa dos
AVALIAÇÃO TRIBOLÓGICA DO BIODIESEL
DERIVADO DO SEBO BOVINO. / Marcus Vinícius Sousa
dos Santos. - Natal/RN, 2023.
57p.

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

1. Biodiesel. 2. Sebo bovino. 3. HFRR. 4. Tribologia. 5.
Lubrificação. I. Caland, Lília Basilio de. II. Universidade do
Estado do Rio Grande do Norte. III. Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pela Diretoria de Informatização (DINF), sob orientação dos bibliotecários do SIB-UERN, para ser adaptado às necessidades da comunidade acadêmica UERN.

MARCUS VINÍCIUS SOUSA DOS SANTOS

AVALIAÇÃO TRIBOLÓGICA DO BIODIESEL DERIVADO DO SEBO BOVINO

Monografia apresentada à Universidade do Estado do Rio Grande do Norte - UERN - como requisito obrigatório para obtenção do título de Bacharelado em Ciência e Tecnologia.

Aprovado em ____/____/____.

Banca Examinadora

Prof Dr. Lília Basilio de Caland

Jonathan Wallace da Silva Araújo

Thalita Queiroz da Silva

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar a minha profunda gratidão por todos que contribuíram para a realização do meu Trabalho de Conclusão de Curso (TCC). Primeiramente, agradeço à minha orientadora Prof. Dr. Lília Basilio de Caland, que dedicou seu tempo e conhecimento para me guiar durante todo o processo de pesquisa e escrita do trabalho. Sua paciência, apoio e incentivo foram fundamentais para que eu pudesse concluir este projeto com sucesso.

Também gostaria de agradecer à Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) por ceder os espaços de laboratórios para a realização dos experimentos que foram essenciais para o meu trabalho. A disponibilidade desses recursos foi fundamental para que eu pudesse realizar os experimentos e alcançar os resultados necessários para a conclusão do TCC.

Não posso deixar de agradecer à minha família e amigos, que me apoiaram incondicionalmente durante todo o processo. Seus encorajamentos, palavras de incentivo e apoio emocional foram fundamentais para que eu pudesse me manter motivado e focado durante todo o período de desenvolvimento do trabalho.

Por fim, gostaria de expressar minha gratidão a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a realização do meu TCC. Este trabalho não teria sido possível sem a ajuda, suporte e colaboração de cada um de vocês. Muito obrigado!

RESUMO

Quando se trata de questões ambientais, a queima de óleo diesel apresenta um alto risco para o planeta devido à liberação de resíduos tóxicos, como óxido de nitrogênio (NO_x), óxido de enxofre (SO_x) e monóxido de carbono (CO). O nitrogênio e o enxofre são necessários para a lubrificação das partes internas do motor, e removê-los completamente pode levar a um aumento no desgaste de certos componentes. Os combustíveis são usados para produzir calor ou energia mecânica por meio de um processo de combustão, enquanto a lubrificação é a capacidade de reduzir o atrito. O biodiesel é uma alternativa mais ambientalmente amigável ao diesel, pois sua queima é mais limpa e causa menos poluição. No entanto, um dos desafios do biodiesel é a produção excessiva de glicerina, que tem pouco valor comercial, mas possui boas propriedades físico-químicas. Por isso, este estudo avalia a lubricidade do biodiesel produzido a partir de sebo bovino, que é utilizado em motores que funcionam com ciclo Diesel, por meio de testes acelerados em uma bancada *High Frequency Reciprocating Rig* (HFRR), conforme a norma ASTM D 6079-0. Durante cada teste de 75 minutos, lubrificado com o biocombustível e repetido três vezes, uma esfera (diâmetro de 6,00±0,05 mm, feita de aço SAE 52100) desliza sobre um disco plano (diâmetro de 9,75 mm, espessura de 2,95 mm, feito de aço SAE 1045), em um movimento alternativo de 1 mm de curso sob uma carga normal de 2 N, a uma frequência de 50 Hz. Os sinais de coeficiente de atrito, percentual de filme lubrificante formado e aquecimento do contato são registrados por sensores acoplados à placa de aquisição de dados e ao sistema HFRR. A análise dos resultados apresentados pelo HFRR mostraram que o biodiesel analisado neste estudo causou escaras de desgaste na esfera que foram consideravelmente semelhantes, apresentou um coeficiente de atrito de 0,113 a 0,163 e uma formação de filme bastante variável de 20% a 50% durante o tempo de 75 minutos de ensaio.

Palavras-chave: Biodiesel, sebo bovino, HFRR, tribologia, lubrificação.

ABSTRACT

When it comes to environmental issues, burning diesel oil poses a high risk to the planet due to the release of toxic residues such as nitrogen oxide (NO_x), sulfur oxide (SO_x), and carbon monoxide (CO). Nitrogen and sulfur are necessary for lubricating the internal parts of the engine, and removing them completely can lead to increased wear of certain components. Fuels are used to produce heat or mechanical energy through a combustion process, while lubrication is the ability to reduce friction. Biodiesel is a more environmentally friendly alternative to diesel because its combustion is cleaner and causes less pollution. However, one of the challenges of biodiesel is the excessive production of glycerin, which has little commercial value but has good physicochemical properties. Therefore, this study evaluates the lubricity of biodiesel produced from beef tallow, which is used in engines that run on the Diesel cycle, through accelerated tests on a High-Frequency Reciprocating Rig (HFRR), according to ASTM D 6079-0 standard. During each 75-minute test, lubricated with the biofuel and repeated three times, a sphere (diameter of 6.00 ± 0.05 mm, made of SAE 52100 steel) slides over a flat disk (diameter of 9.75 mm, thickness of 2.95 mm, made of SAE 1045 steel), in an alternate movement of 1 mm stroke under a normal load of 2 N, at a frequency of 50 Hz. The signals of friction coefficient, percentage of lubricating film formed, and contact heating are recorded by sensors attached to the data acquisition board and the HFRR system. The analysis of the results presented by the HFRR showed that the biodiesel analyzed in this study caused considerably similar wear scars on the sphere, presented a highly variable film formation during the test time, and a very stable friction coefficient.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Gráfico da frota de veículos automotivos no Brasil de 2006-2021	13
Figura 2- Imagens ilustrativas das peças de um motor alternativo	18
Figura 3- Principais partes do motor de combustão interna.....	20
Figura 4- Cabeçote de um motor	20
Figura 5- Bloco de um motor	21
Figura 6- Cárter de um motor	22
Figura 7- Reação de transesterificação	26
Figura 8- Diagrama de produção do sebo bovino	29
Figura 9- Lixamento das amostras	36
Figura 10- Polimento das amostras com a Alumina 1 μ m em uma Politriz Aeropol .	37
Figura 11- Par esfera disco após o polimento	37
Figura 12- <i>High Frequency Reciprocating Rig</i> (HFRR)	38
Figura 13- Gráfico do primeiro ensaio HFRR para o biodiesel de sebo bovino	40
Figura 14- Gráfico do segundo ensaio HFRR para biodiesel de sebo bovino	41
Figura 15- Gráfico do terceiro ensaio HFRR para biodiesel de sebo bovino	42
Figura 16- Escaras do primeiro ensaio	43

Figura 17- Escaras do segundo ensaio	44
Figura 18- Escaras do terceiro ensaio	44
Figura 19- Análise “A” no EDS após segundo ensaio no HFRR. Aspectos topográficos e de composição dentro da zona de contato	45
Figura 20- Análise “B” no EDS após segundo ensaio no HFRR. Aspectos topográficos e de composição fora da zona de contato	46
Figura 21- Análise “C” no EDS após segundo ensaio no HFRR. Aspectos topográficos e de composição fora da zona de contato	47
Figura 22- Análise “A” no EDS após terceiro ensaio no HFRR. Aspectos topográficos e de composição dentro da zona de contato	48
Figura 23- Análise “B” no EDS após terceiro ensaio no HFRR. Aspectos topográficos e de composição fora da zona de contato	49
Figura 24- Análise “C” no EDS após terceiro ensaio no HFRR. Aspectos topográficos e de composição fora da zona de contato	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Descrição por nome das peças de um motor automotivo	18
Tabela 2- Percentual de ácidos graxos presentes no sebo bovino	26
Tabela 3- Características das oleaginosas com potencial para a produção de biodiesel	28
Tabela 4- Características físico-química ideais do sebo bovino	29
Tabela 5- Especificações do sebo bovino para obtenção do biodiesel	30
Tabela 6- Composição química em ácidos graxos do sebo bovino	30
Tabela 7- Composição do Aço dos Discos (SAE 1045) e das Esferas (AISI 52100)	35
Tabela 8- Parâmetros norma (ASTM D 6079-04)	39
Tabela 9- Resultados do tamanho das escaras ocasionadas na superfície das esferas durante os três ensaios realizados no HFRR	44

LISTA DE SIGLAS

ANP - Agência Nacional do Petróleo

AGL - Ácidos Graxos Livres

AISI - *American Iron and Steel Institute*

ASTM - *American Society for Testing and Materials*

EDS - Espectroscopia por Dispersão de Elétrons

HFRR - *High Frequency Reciprocating Rig*

MEV - Microscopia Eletrônica de Varredura

SAE - *Society of Automotive Engineers*

UFRN - Universidade Federal do Rio Grande do Norte

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas

SUMÁRIO

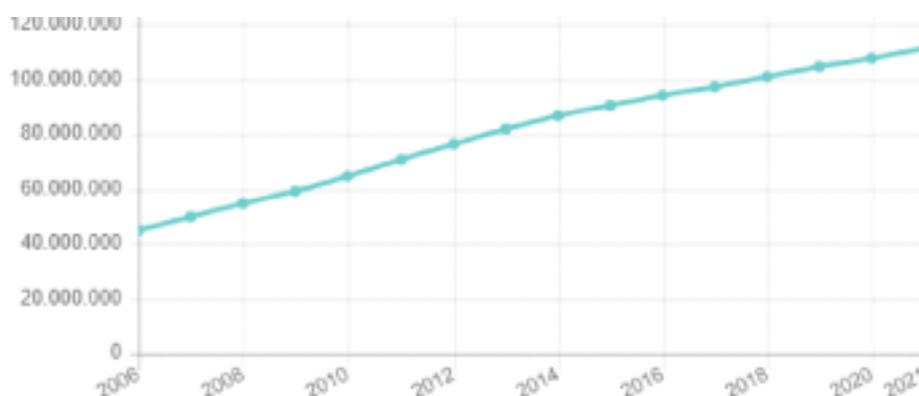
1 INTRODUÇÃO	13
2 REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1 COMBUSTÍVEL FÓSSIL	16
2.1.1 Óleo diesel	17
2.2 MOTOR DIESEL	17
2.2.1 Motores de combustão externa	18
2.2.2 Motores de combustão interna	18
2.3 BIODIESEL	22
2.3.1 Propriedades físico-química do biodiesel	23
2.3.2 Viscosidade do biodiesel	23
2.3.3 Densidade do biodiesel	24
2.3.4 Número de Cetano	24
2.3.5 Ponto de fulgor	25
2.3.6 Obtenção do biodiesel	25
2.4 OLEAGINOSAS	27
2.4.1 Soja	27
2.4.2 Girassol	27
2.4.3 Algodão	27
2.5 SEBO BOVINO	28
2.5.1 Vantagens e desvantagens da utilização do sebo bovino na produção de biodiesel.	30
2.6 CIÊNCIA TRIBOLÓGICA	32
2.6.1 Desgaste corrosivo	32
2.6.2 Desgaste abrasivo	33
2.6.3 Desgaste adesivo	33
2.6.4 Desgaste por fadiga	33
3 MATERIAIS E MÉTODOS	34
3.1 Preparação da amostra de biodiesel de sebo bovino	34
3.2 Preparação do par tribológico esfera e disco plano	35
3.3 Ensaio tribológicos em bancada HFRR	37
3.4 Análise morfológica e química da esfera e do disco após ensaios no HFRR	39
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	40
4.1 Ensaio de lubricidade HFRR do sebo bovino	40
4.2 Análise das escaras apresentadas na esferas.	43
4.3 Análise de desgaste por EDS	45
5 CONCLUSÃO	51
6 REFERÊNCIAS	54

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, em virtude da crescente preocupação com os impactos ambientais, técnicos, econômicos e sociais gerados pelo uso de combustíveis fósseis como o petróleo, gás natural e carvão mineral, a busca por fontes de energias limpas e renováveis vem aumentando no Brasil e em outros países. Essa tendência se deve à luta conservacionista e ambiental contra o aquecimento global, que torna necessário que o país invista em estudos e tecnologias para avançar na obtenção de fontes de energias renováveis. Além disso, o Brasil apresenta características favoráveis à utilização de matérias-primas renováveis, o que reforça ainda mais a importância desse investimento.

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, como mostra na Figura 1, é evidente o aumento constante da frota de veículos automotivos no Brasil, em sua grande maioria, automotivos movidos a combustíveis de origem fóssil. Diante disso, torna-se notório o risco de esgotamento das reservas de petróleo. A preocupação com o aquecimento global e preservação do meio ambiente também são motivos que vem estimulando os estudos e pesquisas no desenvolvimento de novos combustíveis. Diante desse cenário, o principal foco dos estudos e pesquisas, é encontrar um combustível de origem não fóssil, sendo derivado de matéria-prima renovável.

Figura 1: Gráfico da frota de veículos automotivos no Brasil de 2006-2021.



Fonte: BRASIL, IBGE.

Os motores automotivos, em sua maioria, são movidos a combustíveis fósseis

derivados do petróleo, como a gasolina e o diesel. É importante destacar que há diferenças significativas entre motores movidos a gasolina e motores movidos a diesel, uma vez que cada combustível apresenta suas próprias características e propriedades. Os motores a diesel, por exemplo, requerem um combustível com propriedades lubrificantes, devido ao funcionamento da bomba, que necessita de combustível na corrente para lubrificar adequadamente seus componentes em movimento relativo. Por isso, os motores a diesel são mais comuns em automóveis de grande porte (POSSIDONIO, 2008).

Diante disso, os lubrificantes são substâncias amplamente utilizadas em diversos setores da indústria, incluindo o automotivo, para reduzir o atrito e o desgaste das peças móveis. Além disso, os lubrificantes apresentam diversas outras funções importantes, como a separação das peças móveis, que impede o contato direto entre as superfícies metálicas, reduzindo a fricção e o desgaste, ajudando na transferência de calor e evitando o superaquecimento e a falha do motor.

Outra função importante dos lubrificantes é a resistência à abrasão, que protege as peças móveis contra desgastes causados por partículas e impurezas presentes no ambiente externo. Além disso, os lubrificantes também atuam como inibidores da corrosão, evitando a formação de óxidos e outras reações químicas indesejadas entre as superfícies metálicas, o que aumenta a vida útil do motor e das peças que o compõem.

O biodiesel é um substituto do diesel com combustão mais limpa, produzido a partir de fontes renováveis e naturais, como óleos vegetais e animais, sendo quimicamente ésteres de ácidos graxos. Assim como o diesel mineral, o biodiesel pode ser utilizado em motores de combustão-ignição. Além disso, o biodiesel possui vantagens como alto ponto de fulgor, mínimo teor de enxofre e mínimo teor de substâncias aromáticas, o que leva a uma redução nas emissões de gases de escapamento. O biodiesel pode ser usado na sua forma pura ou como aditivo ao combustível diesel para melhorar suas propriedades, tornando-se um grande aliado na busca pelo combustível ideal (UDAETA *et al*, 2016)

Diversos estudos estão sendo realizados para avaliar a possibilidade de substituição do diesel pelo biodiesel. Comparando os dois combustíveis, vários fatores são levados em consideração, como econômicos, ecológicos, sociais, ambientais e políticos. Enquanto o diesel se destaca em termos econômicos, o biodiesel sobressai nos campos ambientais, sociais e políticos. No entanto, as

matérias-primas utilizadas na produção de biodiesel, têm grande destaque na diversidade brasileira, dando ênfase na preponderância da soja. Neste cenário, abre-se espaço para outros tipos de matérias primas. Um grande e bom exemplo, é o sebo bovino, que tem como principal origem, a carne bovina (biodiesel de sebo bovino).

Desta maneira, este estudo tem como objetivo contribuir na análise do biodiesel derivado do sebo bovino e suas características de lubrificação, atrito e desgaste em motores movidos a combustível diesel, a fim de entender melhor os fenômenos de lubrificação. Analisando o biodiesel provenientes do sebo bovino, serão estudadas as propriedades tribológicas dos óleos lubrificantes, incluindo atrito, desgaste e lubrificação nas peças metálicas do motor. Espera-se que esta pesquisa possa contribuir para a busca de alternativas mais sustentáveis e eficientes de combustíveis e lubrificantes para motores.

Objetivos

Objetivo geral:

- Analisar o efeito que o uso de biodiesel, oriundo do sebo bovino causa sobre o desgaste de peças metálicas que compõem o motor.

Objetivos específicos:

- Avaliar o desgaste do par esfera-disco plano (metal-metal) em contato com o biodiesel de sebo bovino através do ensaio tribológico no High Frequency Reciprocating Rig (HFRR);
- Verificar o desgaste mecânico das peças após serem submetidas aos ensaios;
- Verificar a morfologia do desgaste dos discos após os ensaios de desgaste através de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV);
- Verificar os aspectos topográficos e composicionais do desgaste dos discos, através de técnicas de Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS), após ensaio tribológico.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Tendo em vista os biocombustíveis e seu grande crescimento em nosso país, esse trabalho irá decorrer sobre o potencial de produção de biodiesel, suas principais características e a possibilidade de utilizar o biocombustível como alternativa de substituição para motores automotivos.

2.1 COMBUSTÍVEL FÓSSIL

Os combustíveis fósseis são formados a partir do petróleo, gás natural e carvão mineral. São utilizados pela humanidade há milhares de anos, em especial o carvão mineral. A combustão dos combustíveis fósseis gera gases que aumentam o efeito estufa, com espantosas consequências no aquecimento global acompanhada de grandes tragédias (CIÊNCIA ELEMENTAR, 2014).

No Brasil, o carvão mineral como fonte de energia não é muito utilizado, visto que a produção de energia é marcadamente proveniente de fontes hidráulicas. No caso do carvão vegetal, existe um maior controle com relação a sua utilização, visto que seu consumo provoca um desmatamento considerável das florestas; mesmo assim, a lenha participa com 8,3% da matriz energética nacional (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2013).

Os combustíveis sólidos têm uma certa desvantagem em relação aos combustíveis líquidos. De acordo com Manoel (2016) geralmente os combustíveis líquidos têm um maior poder calorífico, maior facilidade e economia de armazenamento e fácil controle de consumo. No Brasil a principal fonte de combustíveis líquidos é adquirida através do petróleo. Os mais utilizados são: gasolina, álcool, óleo diesel e querosene.

2.1.1 Óleo diesel

Combustível derivado do petróleo, constituído principalmente por hidrocarbonetos, o óleo diesel é uma mistura composta por átomos de carbono, hidrogênio e em baixas quantidades por enxofre, nitrogênio e oxigênio. O óleo diesel é um combustível inflamável, consideravelmente tóxico, límpido, volátil e com um odor forte e característico (Manoel, 2016).

O óleo diesel é utilizado em motores de combustão interna e ignição por compressão (ciclo diesel) empregados nas mais diversas aplicações, tais como: automóveis, furgões, ônibus, caminhões, pequenas embarcações marítimas, máquinas de grande porte, locomotivas, navios e aplicações estacionárias (geradores elétricos, por exemplo) (PETROBRAS, 2012).

2.2 MOTOR DIESEL

Motores são classificados como máquinas térmicas que transformam energia térmica em energia mecânica (Martins, 2006). Máquinas térmicas que queimam combustível e produzem trabalho, ou seja, energia mecânica, são denominados de motor de combustão, que atualmente é a maior fonte de força para a locomoção automotiva.

Motor é uma máquina destinada a converter qualquer forma de energia térmica, elétrica, hidráulica, química e outras, em energia mecânica (Tillmann, 2013, p. 45).

Motor de combustão converte energia térmica em trabalho mecânico. Para essa conversão acontecer, está diretamente relacionado com o comportamento do fluido de trabalho, podendo estar totalmente separado da mistura ar/comprimido ou o fluido de trabalho consistir nos próprios produtos da combustão na mistura ar/comprimido (CASTRO; RAHDE, 2014).

2.2.1 Motores de combustão externa

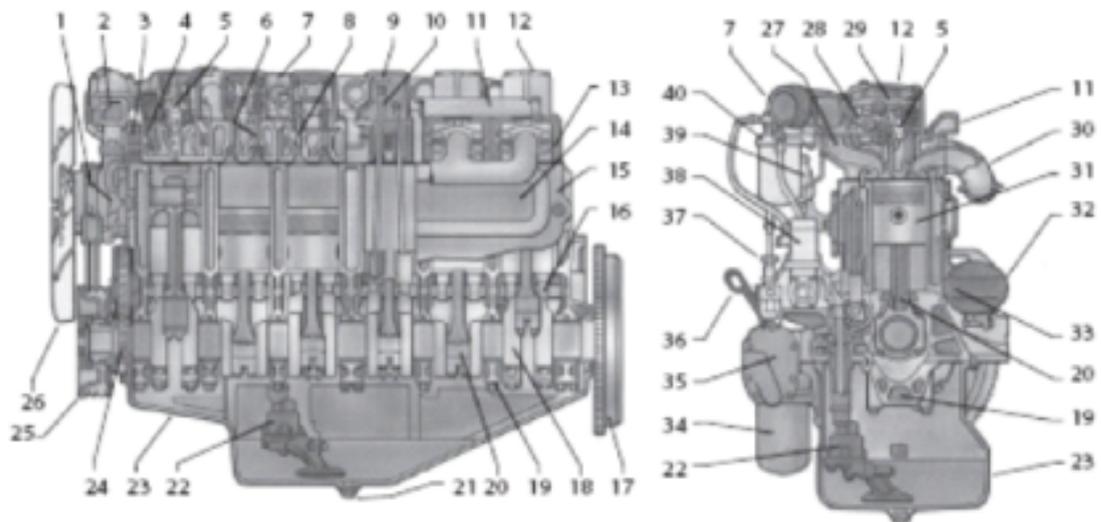
Quando o fluido ativo não participa diretamente da combustão, sendo o calor transferido ao fluido através da parede de um permutador de calor, denomina-se um motor de combustão externa. "A combustão é realizada externamente ao motor, isto é, o calor é produzido fora do motor em local denominado de caldeira" (Varella, 2015).

2.2.2 Motores de combustão interna

Por sua vez, quando o trabalho mecânico é obtido a partir da queima do combustível dentro do fluido ativo, denomina-se motor de combustão interna. "A combustão é realizada dentro do próprio motor." (Varella, 2015).

A Figura 2 apresenta os principais componentes de um motor alternativo de combustão interna e logo em seguida a Tabela 1 com suas nomenclaturas (SIMÊNCIO, 2019)

Figura 2: Imagens ilustrativas das peças de um motor alternativo.



Fonte: Brunetti (2012, p. 23)

Tabela 1: Descrição por nome das peças de um motor automotivo.

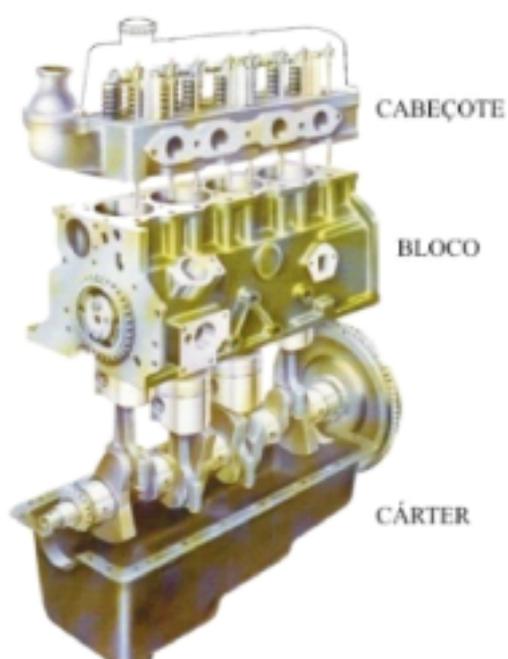
1. Bomba d'água	2. Válvula termostática	3. Compressor de ar	
4. Duto de admissão	5. Injetor de combustível	6. Válvula de escapamento	
7. Coletor de admissão	8. Válvula de admissão	9. Linha de combustível	
10. Haste de válvula	11. Duto de água	12. Tampa de válvula	
13. Cabeçote	14. Tampa lateral	15. Bloco	
16. Eixo comando de válvulas	17. Volante	18. Virabrequim	
19. Capa de mancal	20. Biela	21. Bujão de cárter	
22. Boma de óleo	23. Cárter	24. Engrenagem do virabrequim	
25. Amortecedor vibracional	26. Ventilador	27. Duto de admissão	
28. Balancim da válvula de admissão	29. Balancim de válvula de escapamento	30. Coletor de escapamento	
31. Pistão	32. Motor de partida	33. Dreno de água	
34. Filtro de óleo	35. Radiador de óleo	36. Vareta de nível de óleo	
37. Bomba manual de combustível	38. Bomba injetora de combustível	39. Respiro do cárter	
40. Filtro de combustível			

Fonte: Brunetti (2012, p.23, 24)

Segundo Varella (2015), os motores de combustão interna possuem três principais partes: cabeçote, bloco e cárter. No qual constituem as partes fixas do motor.

A Figura 3 ilustra as principais partes de um motor de combustão interna.

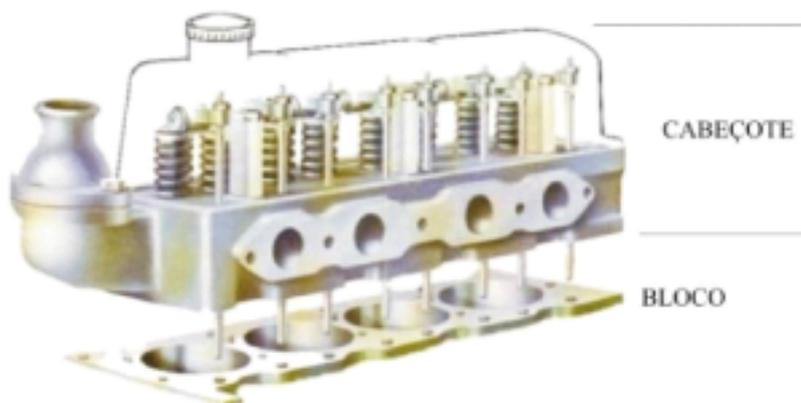
Figura 3: Principais partes do motor de combustão interna.



Fonte: Varella (2015).

O cabeçote é parte superior do motor, no qual fecha o bloco do motor com o propósito de vedar os cilindros, como mostrado na Figura 4.

Figura 4: Cabeçote de um motor.



Fonte: Varella (2015)

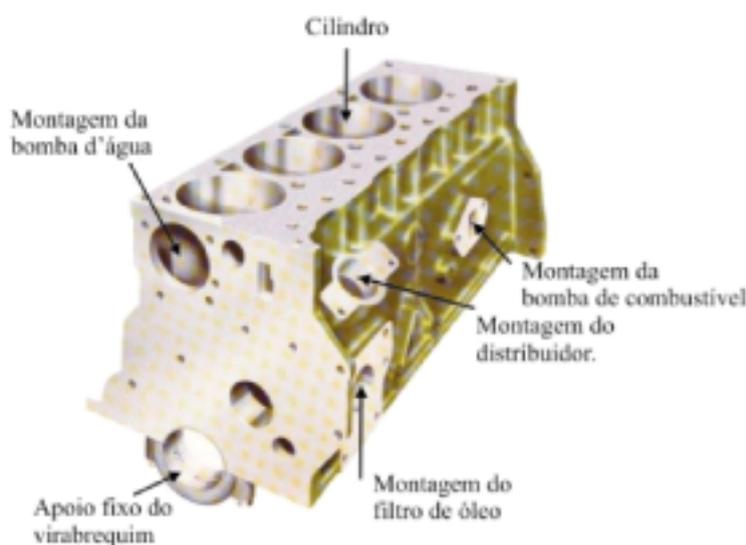
O bloco de acordo com Varella (2015) é a parte central do motor, em sua maioria são constituídos de ferro fundido. Nele estão ligadas, de forma direta ou indireta, todas as peças que compõem o motor.

O bloco do motor tem a finalidade de permitir a passagem do óleo e da água que auxiliarão partes dos sistemas de lubrificação, de arrefecimento e da montagem das demais peças que são acopladas a ele.

Nos blocos existem cavidades denominadas de cilindro, no qual, é um furo no bloco aberto nas duas extremidades. Os cilindros podem ser constituídos por uma peça sobressalente denominada camisa, que é colocada no furo do bloco, evitando que este sofra desgaste. A camisa ou câmara de água é um conjunto de condutores para circulação da água de resfriamento dos cilindros, e, é normalmente fundida com o bloco do qual faz parte integrante." (Varella, 2015).

A figura 5 demonstra o bloco de um motor.

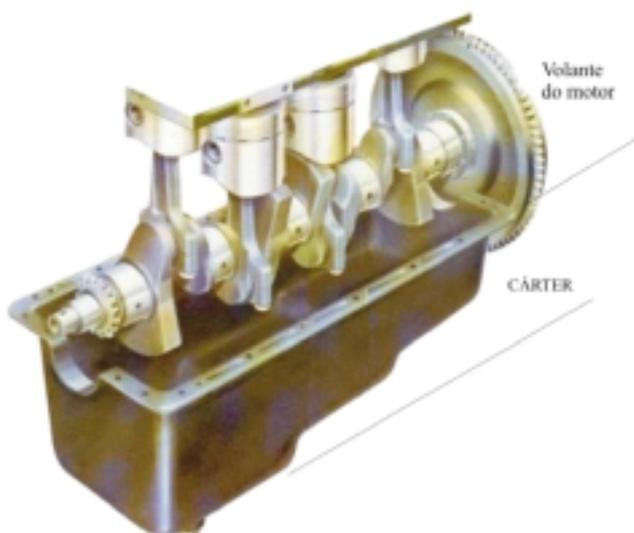
Figura 5: Bloco de um motor.



Fonte: Varella (2015).

O Cárter constitui a parte inferior do motor, tendo sua principal função de armazenamento do óleo lubrificante. No cárter se encontra o principal componente do sistema de lubrificação do motor, a bomba de óleo do lubrificante, no qual ela envia o óleo através do cárter para todos os canais de lubrificação do motor (CASTRO; RAHDE, 2014).

Figura 6: Cárter de um motor.



Fonte: Varella (2015).

2.3 BIODIESEL

De acordo com a Agência Nacional do Petróleo (ANP) o biodiesel (ésteres de ácidos graxos) é um combustível derivado de fontes renováveis naturais, tais como óleos animais e vegetais.

Assim como o diesel mineral, o biodiesel opera em motores de combustão-ignição. Pode ser usado como um substituto, mistura ou aditivo ao óleo diesel. Misturas de até 20% de biodiesel (a 80% de diesel convencional) podem ser usadas em praticamente qualquer equipamento diesel e são compatíveis com a maioria dos equipamentos de armazenamento e distribuição. Tais misturas (20% ou menos) não requerem nenhuma modificação de motor e podem proporcionar performances próximas às do diesel. Misturas mais elevadas, ou até o biodiesel puro (100% biodiesel, ou B100), podem ser usadas em muitos motores com pequenas alterações, posto que as propriedades físicas do Biodiesel são muito semelhantes às do Diesel. (UDAETA *et. al.*, 2016).

O biodiesel pode ser um substituto do diesel, e apresentar uma combustão mais limpa, pois o uso dele, em motores convencionais do tipo diesel, pode reduzir consideravelmente as emissões de hidrocarbonetos, sulfatos, monóxido de carbono

e materiais particulados. Essas reduções variam de acordo com a quantidade de biodiesel que é misturado ao diesel. Quanto maior a quantidade de biocombustível, maior será a redução, ou seja, usando apenas o B100 (biodiesel puro), seria a maior redução possível. Devido o oxigênio do biodiesel possibilitar uma combustão mais completa do CO₂, ainda pode existir uma redução da fração de carbono sólido do material particulado. Além disso, o biodiesel contém menos de 24 ppm de enxofre, reduzindo assim a quantidade de sulfato, mantendo estável ou aumentando a porção solúvel de material particulado. No entanto, a emissão de óxidos nítricos aumenta, de acordo com a quantidade e tipo de biocombustível que é adicionado ao combustível. A principal desvantagem do biodiesel, é o seu custo elevado, até mesmo mais alto do que o do próprio diesel (UDAETA *et. al.*, 2016).

2.3.1 Propriedades físico-química do biodiesel

As propriedades físico-químicas do biodiesel têm grande influência direta no funcionamento dos motores, principalmente os do ciclo diesel. Devido ao combustível está diretamente relacionado com a potência, consumo, eficiência, durabilidade e vida útil e do motor. O biodiesel apresenta uma composição química complexa, as propriedades físico-químicas e sua estrutura depende diretamente da sua forma de obtenção e origem (Fernandes, 2011) *apud* (Chagas, 2015).

Entre os vários fatores que influenciam o trabalho realizado pela combustão de motores por ignição podemos citar: o alcance do jato combustível, a taxa de compressão, o efeito da pulverização na câmara, a turbulência do ar na câmara, e as temperaturas do ar e do fluido de arrefecimento (Chagas, 2015). Todavia, também existem outros parâmetros de propriedades físico-químico que do mesmo modo influenciam a combustão.

2.3.2 Viscosidade do biodiesel

Quando um fluido se move em relação a um sólido, ou quando dois fluidos se movem um em relação ao outro, a intensidade da força exercida no movimento, gera um coeficiente de atrito entre eles. A viscosidade é a propriedade que retrata a resistência interna do líquido ao movimento ou a fluidez (Çengel e Cimbala, 2015).

A viscosidade dinâmica pode ser definida como a relação entre a tensão de cisalhamento aplicada e a taxa de deformação ocorrida no fluido. Já a viscosidade cinemática é uma relação da viscosidade dinâmica de um fluido dividido por sua massa específica. De forma geral, a viscosidade dos fluidos aumenta com o decréscimo da temperatura. (NEIVA, 2022)

De acordo com a ANP, a viscosidade de um combustível demonstra a sua resistência ao escoamento, quando exposto a uma determinada temperatura. O controle da viscosidade de um biodiesel é ideal para garantir funcionamento adequado dos sistemas de injeção e bombas de combustível. Por sua vez, a viscosidade, também tem sua interferência na combustão do biodiesel.

2.3.3 Densidade do biodiesel

Segundo Abraham (2011) a densidade é o indicativo de como a matéria está distribuída no corpo, podendo ser caracterizada pela quantidade de massa por unidade de volume. Devido a densidade do biodiesel ser maior que a do diesel convencional, tem um desempenho direto no funcionamento do motor do tipo diesel. Desta forma, essa propriedade físico-químico deve ser enquadrada na faixa de qualidade estabelecida pela ANP.

De modo geral, se a densidade for apresentada acima do recomendado, pode ocasionar a uma mistura ar/combustível, que ocasiona o aumento da emissão de poluentes. Sendo apresentada abaixo do recomendado, pode ocasionar uma fraca mistura de ar/combustível, ocasionando uma perda de potência do motor e aumentando o consumo de combustível.

2.3.4 Número de Cetano

O número de cetano está relacionado com a qualidade de ignição do combustível, representando o período entre o início da injeção de combustível e o início da combustão, demonstrando o quão inflamável é o combustível. Uma combustão em condições favoráveis, apresenta uma ignição rápida, seguida de uma combustão leve e completa do combustível (MENEZES *et al.*, 2021).

Mesmo se tratando de um valor adimensional, quanto maior for o número de Cetano do combustível, melhor será sua combustão, promovendo uma rápida

ignição, fazendo com que o motor trabalhe sob baixa carga e melhorando seu funcionamento. Por outro lado, um baixo número de cetano no combustível, pode ocasionar um retardo da ignição, logo, fazendo com que o motor trabalhe sob altas cargas, conseqüentemente prejudicando seu funcionamento (MENEZES *et al.*, 2021).

2.3.5 Ponto de fulgor

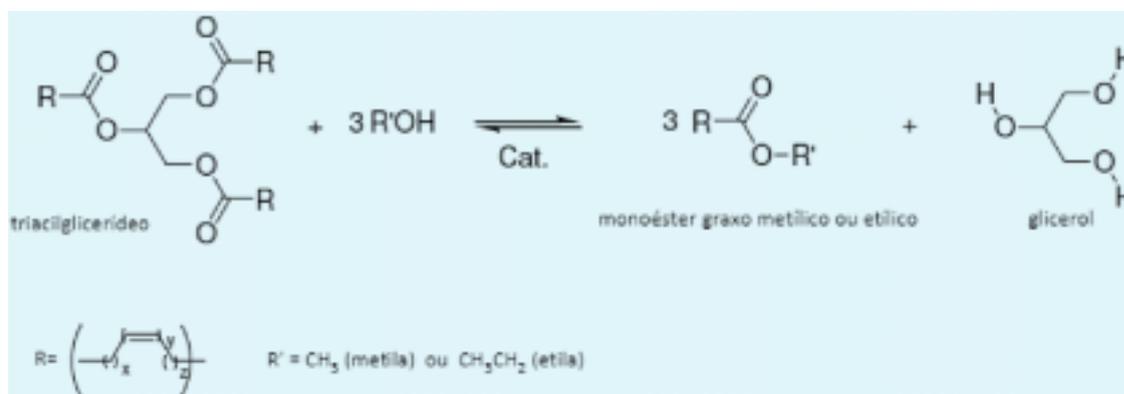
Ponto de fulgor condiz com a menor temperatura, há uma pressão de 101,3 kPa necessária para um líquido combustível inflamável emitir vapor. Também está diretamente relacionado com as suas condições de armazenamento, e seu grau de explosividade e inflamabilidade do combustível. "O ponto de fulgor do combustível não tem qualquer relação significativa com o desempenho do combustível no motor, a temperatura de autoignição não é influenciada por variações no ponto de fulgor." (TOTTEN, 2003) *apud* (Chagas, 2015).

2.3.6 Obtenção do biodiesel

O Biodiesel, como descrito anteriormente, é "composto por monoésteres de ácidos graxos com monoálcoois de cadeia curta." (Meneghetti, 2013). O principal modo de obtenção do biodiesel no nosso país, é através de transesterificação, envolvendo a reação de triacilglicerídeo (encontrados predominante em óleos vegetais e animais) com álcoois de cadeia curta, junto a presença de um catalisador. A presença de catalisadores no processo de obtenção do biodiesel é do tipo bases e ácidos. Quanto mais pura for a matéria prima, melhor será a reação, pois caso contrário, dependendo do tipo de catalisador, pode ocorrer uma saponificação, na qual dá origem a formação de emulsões e irá complicar a purificação do biodiesel (Meneghetti, 2013).

A figura 7 representa bem essa reação geral de transesterificação:

Figura 7: Reação de transesterificação.



Fonte: Meneghetti, Meneghetti e Brito (2013).

A Tabela 2 mostra a estrutura geral de um triglicerídeo e o percentual de ácidos graxos presente na estrutura do sebo bovino.

Tabela 2: Percentual de ácidos graxos presentes no sebo bovino.

Composição em ácidos graxos para triacylglicerídeos de sebo bovino	Estrutura	Porcentagem presente no glicerídeo ²
Ácido Mirístico	C14:0	1,0 – 6,0
Ácido Palmítico	C16:0	20,0 – 37,0
Ácido Palmitoleico	C16:1	1,0 – 9,0
Ácido Margárico	C17:0	1,0 – 3,0
Ácido Estearico	C18:0	25,0 – 40,0
Ácido Oleico (Ômega 9)	C18:1	31,0 – 50,0
Ácido Linoleico (Ômega 6)	C18:2	1,0 – 5,0

²Physical and Chemical Characteristics of Oils, Fats, and Waxes - AOCS.

Fonte: Meneghetti, Meneghetti e Brito (2013).

2.4 OLEAGINOSAS

O Brasil é um dos países que mais produz e tem a maior variedade de oleaginosas nas suas safras, por isso, se tornou um dos maiores produtores de biodiesel do mundo. Diante da sua grande variedade, são necessárias análises e pesquisas das essências oleaginosas encontradas no Brasil, com o intuito de analisar as características físico-químicas, vantagens e desvantagens para a produção do biodiesel.

2.4.1 Soja

Apesar de possuir um baixo teor de óleo, a soja é a principal fonte de matéria-prima para a produção de biodiesel no Brasil, que conforme os dados da Embrapa (2021) na safra de 2020/21, o país é o maior produtor mundial do grão.

2.4.2 Girassol

As sementes de girassol é uma das matérias-primas com maior teor oleico para se produzir o biodiesel, ou seja, uma maior quantidade de ácidos graxos em sua composição, fazendo com que a oleaginosa tenha um teor de óleo de 38 a 48%. Se comparado com outros biodieseis de outras oleaginosas, o biodiesel de girassol fica para trás em relação a estabilidade oxidativa, porém com a adição de alguns antioxidantes, pode ocasionar em uma melhora do combustível (Santos *et. al.*, 2021).

2.4.3 Algodão

O Brasil como o grande produtor de algodão, também utiliza dessa matéria-prima para produção do biodiesel. Além de apresentar um percentual de óleo de 12 a 27%, o algodão também tem como coprodutor o línter, que é bastante usado na produção de tecelagem (Santos *et. al.*, 2021).

Na Tabela 3 mostra as principais características de algumas oleaginosas para a produção do biodiesel.

Tabela 3: Características das oleaginosas com potencial para a produção de biodiesel.

Cultivar	Óleo (%)	Cultivo	Rendimento de óleo (kg/ha)
Palma (fruto)	22	Perene	2000-8000
Pinhão manso	38	Perene	1200-1500
Babaçu	60	Perene	120
Mamona	39,6-59,8	Anual	470
Amendoim	40-60	Anual	788
Girassol	40-47	Anual	774
Soja	18-21	Anual	560
Colza	34-40	Anual	570
Algodão (caroço)	18-20	Anual	361

Fonte: Meneghetti, Meneghetti e Brito (2013).

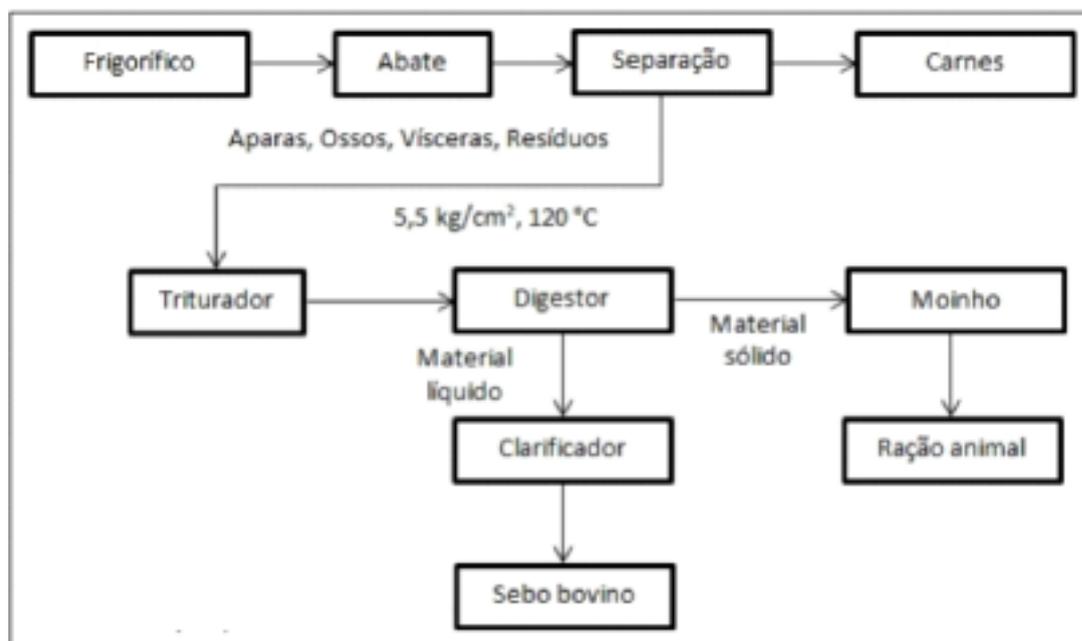
2.5 SEBO BOVINO

A pecuária brasileira está entre uma das maiores do mundo. Quando se trata do seu aproveitamento, a carne é o principal produto no abate bovino, além da carne, seus subprodutos também são aproveitados para outros processos, como a pele, muito utilizado para a confecção de bolsas e calçados, o osso, processado e utilizado para a produção de ração animal, e o próprio sebo, utilizado tanto para a indústria de limpeza e higiene e também em nosso principal foco, o biodiesel (UDAETA, 2016).

Como citado acima, o sebo é uma gordura obtida como subproduto na indústria de carne bovina. De modo geral, sua obtenção acontece a partir do cozimento de vísceras, ossos, partes não comestíveis ou condenadas, líquidos gordurosos que passam por um processamento e em seguida por meio de prensagem, utilizando solventes orgânicos ou centrifugação, é separada a gordura que se encontra nesses compostos (Varão *et. al.*, 2017).

Figura 8 descreve um breve diagrama da produção do sebo bovino.

Figura 8: Diagrama de produção do sebo bovino.



Fonte: (Varão et. al., 2017)

As propriedades físico-químicas e a composição química da matéria-prima (sebo bovino) influenciam diretamente nas características do biocombustível obtido, seja nas limitações/restrições para seu uso, quanto nas suas vantagens.

Para a obtenção de um sebo bovino de boa qualidade, são levados em consideração alguns parâmetros, dos quais: uso moderno no abate do boi, seleção e controle de qualidade das gorduras, juntamente com um bom manuseio e estocagem do sebo. Além desses processos, também têm características físico-química ideais para a obtenção da gordura, mostradas na Tabela 4.

Tabela 4: Características físico-química ideais do sebo bovino.

Índices	Unidades	Valores de referência
Peso específico (25°C)	g/cm ³	0,903-0,907
Índice de refração (40°C)	-	1,450-1,458
Índice de iodo	g I ₂ / 100g	33-47
Índice de saponificação	mg KOH/g	190-200
Matéria de insaponificável	%	< 0,5%
Ponto de fusão	°C	45-48

Fonte: Levy (2011) *apud* Varão et. al. (2017).

Já para a produção do biodiesel, são exigidas algumas especificações (mostrada na Tabela 5) para um sebo de qualidade, e a partir daí ter uma maior eficácia na reação de transesterificação para obter o biodiesel.

Tabela 5: Especificações do sebo bovino para obtenção do biodiesel.

Característica	Limite Máximo
Ácido Graxo Livre (%)	1,0
Umidade (%)	0,3
Impurezas (%)	0,1
Insaponificáveis (%)	0,6
Título (%)	40-46

Fonte: Andrade Filho (2007) *apud* Varão et. al. (2017).

A composição química do sebo bovino é basicamente composta por triglicerídeos, tendo em maior quantidade os ácidos graxos de cadeia saturada, como mostra na Tabela 6 abaixo:

Tabela 6: Composição química em ácidos graxos do sebo bovino.

Ácido graxo	Fórmula
Láurico	C12:0
Mirístico	C14:0
Palmítico	C16:0
Esteárico	C18:0
Oleico	C18:1
Linoleico	C18:2
Linolênico	C18:3
Outros	-

Fonte: Varão et. al. (2017)

2.5.1 Vantagens e desvantagens da utilização do sebo bovino na produção de biodiesel.

Por ter um aproveitamento de um para um, ou seja, 1kg de sebo bovino é produzido 1kg de óleo, o aproveitamento da matéria-prima é de 100%. Em vista disso o sebo bovino apresenta grande potencial de uso pela indústria de biodiesel no Brasil, e também devido aos aspectos econômicos e ambientais, além de suas propriedades energéticas e físico-químicas.

Um dos principais benefícios da utilização do sebo para o biodiesel no Brasil é a grande produção nacional desse insumo, tornando-o uma matéria-prima barata e prontamente disponível em áreas agroindustriais. Por ser um subproduto, seu direcionamento não representa um problema para o equilíbrio entre produção de alimentos e energia. Além disso, as unidades de produção de biocombustíveis podem ser acopladas a plantas industriais que abatem animais, o que pode significar economia para o produtor de biocombustíveis, reduzindo o custo de transporte da matéria-prima e garantindo o abastecimento durante todo o ano (Varão *et. al.*, 2017).

O envio de sebo para conversão em biodiesel é uma alternativa para a destinação correta desse resíduo, que possui alto potencial poluente e muitas vezes representa um problema ambiental. Antes alguns dos métodos utilizados pelos frigoríficos e curtumes em relação ao destino final do sebo envolviam enterrá-lo ou queimá-lo em caldeirões, no entanto, ambos os métodos envolvem riscos de danos ambientais. Outro aspecto ecologicamente correto é que a cadeia produtiva do sebo emite níveis mais baixos de dióxido de carbono (CO₂) do que algumas das principais matérias-primas destinadas à indústria de biodiesel em todo o mundo, como a colza e a soja (Varão *et. al.*, 2017)

Já falando das suas características físico-químicas, o sebo bovino por ser uma matéria prima saturada, possui uma longa cadeia de hidrocarboneto que resultam em um maior número de cetano, dando origem a um biodiesel de melhor qualidade de ignição. Apresenta um maior valor de densidade, dando um menor índice de adulteração na produção. Também manifesta um alto poder calorífico, de maneira que, quanto maior o poder calorífico menor será o consumo de combustível para se atingir a potência pretendida (Cavalcante, 2018).

Por outro lado, as principais questões relacionadas ao uso de gordura bovina pela indústria de biocombustíveis estão relacionadas à extração, qualidade da matéria-prima e algumas de suas propriedades físicas e químicas inerentes.

A disponibilidade de sebo no mercado está relacionada à produção de carne, portanto, existe uma relação entre a demanda por gordura bovina e o mercado de carnes, o que gera flutuações no mercado de sebo em termos de escassez e excedente do produto. O sistema de preços do sebo bovino. A falta de um mercado interno estável faz com que muitos produtores de biodiesel dependam do mercado

de óleo de soja para suas decisões, só buscando o sebo quando o preço do óleo de soja está alto (Varão *et. al.*, 2017).

Em relação às suas características físico-químicas, o sebo bovino possui alto teor de ácidos graxos livres (AGL), entre 0,5 e 4%, o que reduz a eficiência do processo de produção de biodiesel e atrapalha sua purificação, pois os AGL favorecem a formação de sabões em vez de biocombustível. Por apresentar um alto índice de saponificação, podem dificultar o processo de lavagem diminuindo o rendimento da reação. O elevado valor de viscosidade presente no sebo pode levar a problemas no sistema de injeção, vazamento da bomba de combustível, além de outras panes no motor (Cavalcante, 2018).

2.6 CIÊNCIA TRIBOLÓGICA

O termo tribologia vem do grego, tribo – esfregar e logia – estudo. Conhecida na literatura como a ciência dos atritos, de modo geral, é a ciência e tecnologia que estuda a interação entre superfícies, abrangendo conhecimento sobre lubrificação, desgaste e atrito. Um dos principais focos da tribologia é o estudo do desgaste, que denota a perda progressiva de material da superfície de trabalho de um corpo como resultado do movimento relativo das superfícies envolvidas. (Jacob Neto, 2019).

O desgaste ocorre dependendo da cinemática do sistema, podendo variar entre rolamento, deslizamento, impacto e erosão, oscilação, dependendo do tipo de interação e do movimento das interfaces, o desgaste ainda pode ser classificado fisicamente e o estado do contra corpo, sólido ou líquido, ou pelo ângulo de impacto, alto ou baixo. Os processos de desgaste também podem ser classificados pelo elemento de interface, que pode ser de dois corpos ou sob a ação de partículas sólidas pressionadas entre duas superfícies (Milcheski *et. al.*, 2021).

2.6.1 Desgaste corrosivo

Ele ocorre entre um material e as substâncias que entram em contato com ele no ambiente em que o movimento ocorre. Isso seria em meio corrosivo, gasoso ou líquido. Com este tipo de desgaste, os produtos de reação são formados como resultado de interações químicas e eletroquímicas. Essas reações são chamadas de

reações tribo químicas e criam uma camada intermediária na superfície, que posteriormente é removida (Milcheski *et. al.*, 2021).

2.6.2 Desgaste abrasivo

Este desgaste ocorre dependendo da forma e dureza dos dois materiais em contato. Partículas duras e afiadas presentes nas superfícies de interação, ou nas próprias superfícies, que podem ser duras ou afiadas, encontrando asperezas entre elas ou de algum outro meio durante o movimento. Quando se trata do desgaste abrasivo, vários fatores podem ser levados em consideração, como a temperatura do ambiente, a umidade, e a presença de agentes corrosivos, todos eles podendo afetar algumas propriedades mecânicas, uma maior taxa de desgaste, alterando até o tipo de desgaste (Jacob Neto, 2019).

2.6.3 Desgaste adesivo

Ocorre quando a aderência entre as superfícies é forte o suficiente para resistir ao deslizamento, e isso pode ocorrer, por exemplo, em um ambiente mal lubrificado, mesmo em superfícies de baixa rugosidade. Como resultado dessa adesão, ocorre a deformação plástica, o arrasto do material se desenvolve na área de contato e cria uma trinca que pode se propagar, criando um terceiro corpo e a transferência completa do material com o outro (Milcheski *et. al.*, 2021).

2.6.4 Desgaste por fadiga

O desgaste por fadiga ocorre quando dois materiais estão em contato e têm locais de alta tensão superficial e são submetidos a uma série de movimentos repetitivos de rolamento ou deslizamento, produzindo depósitos derivados de trincas propagadas por fadiga. A formação de tensões superficiais que são transferidas para as camadas mais internas do material, podem levar à deformação plástica ou mesmo a rachaduras e desprendimento do material. Materiais com deformidades superficiais são mais propensos a defeitos por fadiga porque essas condições aumentam a probabilidade de desenvolver trincas e fissuras (Jacob Neto, 2019).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Sabe-se que a pesquisa científica tem como objetivo principal descobrir respostas para questionamentos por meio da aplicação de um método científico. A par disso, essa pesquisa foi desenvolvida a partir de uma pesquisa experimental, mediante análise quantitativa dos dados, uma vez que “[...] consiste em determinar um objeto de estudo, selecionar as variáveis que seriam capazes de influenciá-lo, definir as formas de controle e de observação dos efeitos que a variável produz no objeto” (GIL, 2002, p.47).

Para tanto, o objeto da pesquisa foi a utilização do biodiesel derivado do sebo bovino, para a sua avaliação tribológica nos motores automotivos do tipo diesel. Analisando as propriedades de atrito e desgaste e, por conseguinte, a eficiência desta energia renovável. Isso porque, “a coleta de dados na pesquisa experimental é feita mediante a manipulação de certas condições e a observação dos efeitos produzidos” (GIL, 2002, p.100).

3.1 Preparação da amostra de biodiesel de sebo bovino

O sebo bovino e o biodiesel obtido do mesmo, foram adquiridos de uma empresa de coleta de óleo de fritura do estado do Rio Grande do Norte (Indama), empresa na qual foi estabelecida uma parceria com o grupo de pesquisa do qual fiz parte. A síntese do biodiesel foi realizada em duas etapas, segundo o procedimento proposto por Boog *et al.* (2011) e Caland *et al.* (2012). Na primeira etapa, foram adicionados 16% (m/m) de metanol e 0,56% (m/m) de catalisador, calculados em relação à massa do sebo bovino. O sistema foi aquecido à temperatura de aproximadamente 60 °C por 1 hora, sob sistema de refluxo. Após a reação, os produtos obtidos foram colocados num funil de separação para separar os ésteres do glicerol.

Na segunda etapa, os ésteres foram novamente submetidos à reação com adição de 4,0% (m/m) de metanol e 0,14% do catalisador. Após outra separação, a fase superior foi lavada com cinco porções de 100 mL de água destilada para remoção das impurezas como metanol, catalisador e glicerina residual. Em seguida,

o biodiesel produzido foi submetido a aquecimento a uma temperatura de 110 °C por 1 hora para completar o processo de secagem e a eliminação do álcool residual.

Para atender aos parâmetros especificados pela Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), para o biodiesel de sebo produzido, foram avaliadas algumas características físico-químicas.

3.2 Preparação do par tribológico esfera e disco plano

Os materiais que foram utilizados para avaliação da lubricidade HFRR das misturas de combustíveis são compostos por disco plano e esfera de aço. As dimensões dos materiais utilizados na pesquisa: um disco, de 9,75 mm de diâmetro e 2,95 mm de espessura e uma esfera de 6 mm. A esfera composta por pelo aço SAE 52100, seguindo os parâmetros da norma ASTM D 6079-04, porém o disco não foi possível encontrar em território nacional do mesmo tipo de aço, assim sendo substituído pelo aço SAE 1045, sendo obtido em formato de varão e produzido o disco, nas suas medidas necessárias, em processo de torneamento. Dessa forma, as peças metálicas com suas respectivas composições estão mostradas na Tabela 7.

Tabela 7: Composição do Aço dos Discos (SAE 1045) e das Esferas (AISI 52100).

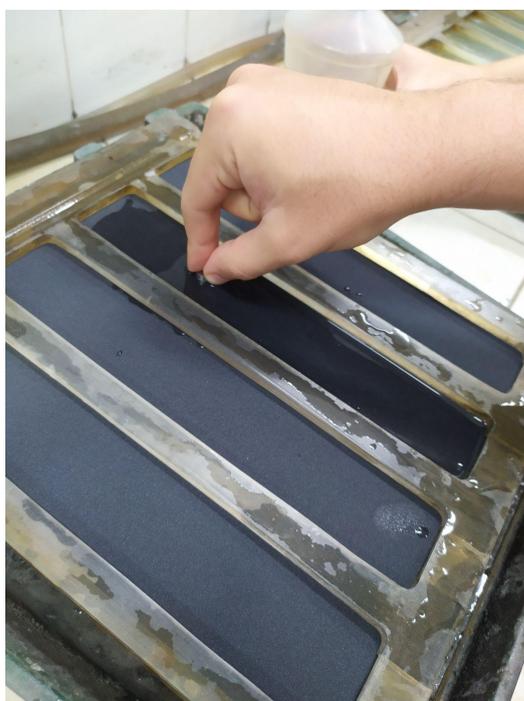
Elemento	Aço do Disco (SAE 1045) Concentração (%)	Aço da Esfera (AISI 52100) Concentração (%)
Manganês, Mn	0,60 a 0,90	0,25 a 0,45
Carbono, C	0,42 a 0,50	0,98 a 1,1
Enxofre, S	0,05 (Max)	<= 0,025
Fósforo, P	0,04 (Max)	<= 0,025
Ferro, Fe	~98,71	96,5 a 97,32
Cromo, Cr	0,0	1,3 a 1,6
Silício, Si	0,0	0,15 a 0,30

Fonte: Autor (2023)

O aço é um dos metais que é usado nos componentes do motor, podendo ser encontrado na extremidade dos pistões, pois não cede a altas pressões e temperaturas e revelasse resistente à corrosão. O disco foi obtido a partir da usinagem em torno mecânico do Laboratório de Manufatura (NTI/UFRN) e o acabamento superficial deste disco foi realizado no Laboratório de Caracterização de Materiais (NTI/UFRN). O polimento é uma etapa importante no processo de preparação de amostras para os ensaios mecânicos e tribológicos, sendo fundamental para garantir a precisão e a reprodutibilidade dos resultados obtidos.

Para o polimento do par esfera-disco realizou-se o lixamento da superfície das amostras com lixas d'água de 400, 600 e 1200 granulações (Figura 9), dando um rugosidade média de $R_a = 0,244 \mu\text{m}$ e desvio padrão de 0,07. Em seguida, as amostras foram polidas com disco de feltro e Alumina de $1\mu\text{m}$, através de uma Politriz Aeropol, como mostra a Figura 10. Após cada lixa d'água e a etapa de polimento, os corpos de prova foram lavados com água corrente e detergente, depois foram secados com algodão e embalados a vácuo, para garantir que as superfícies se mantivessem com qualidade desejada.

Figura 9: Lixamento das amostras.



Fonte: Autor (2023).

Figura 10: Polimento das amostras com a Alumina 1 μ m em uma Politriz Aeropol.



Fonte: Autor (2023).

A Figura 11 mostra o exemplo de um par esfera disco já no sua preparação final e prontas para irem ao ensaio no HFRR.

Figura 11: Par esfera disco após o polimento.



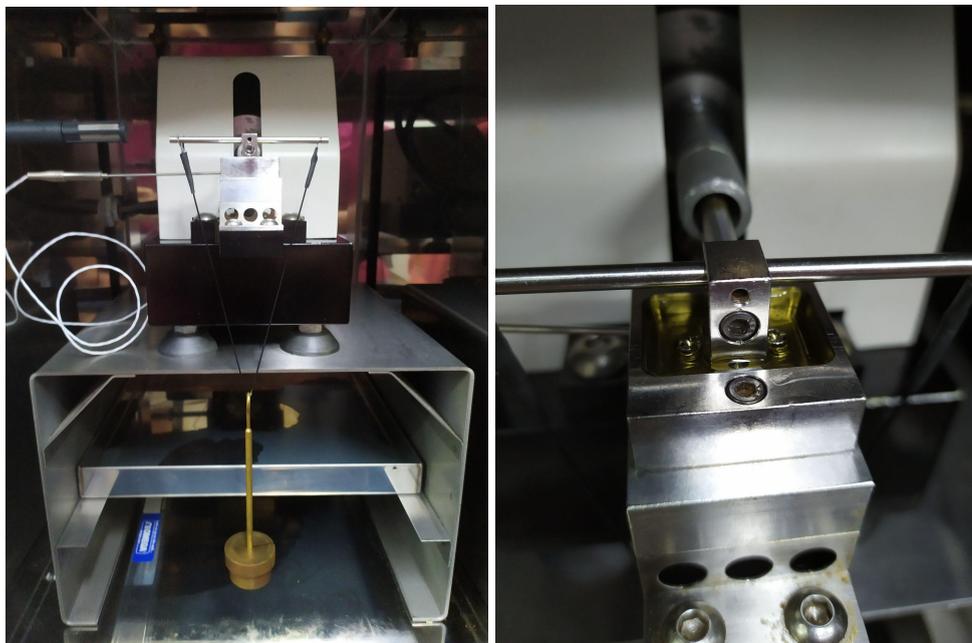
Fonte: Autor (2023)

3.3 Ensaio tribológicos em bancada HFRR

Utilizamos o equipamento HFRR (*High Frequency Reciprocating Rig*) a fim de avaliar e mensurar os parâmetros de resistência e desgaste do par esfera e disco plano em contato com o biodiesel de sebo bovino. Os ensaios tribológicos na

bancada HFRR, foram realizados em triplicata. O equipamento HFRR como mostra na Figura 12 que teve utilização neste trabalho foi fabricado pela PCS Instruments.

Figura 12: *High Frequency Reciprocating Rig* (HFRR).



Fonte: Autor (2023)

O teste HFRR simula condições extremas de desgaste, onde esferas de aço banhadas com o combustível teste são colocadas em atrito severo. Quando o composto possui lubrificidade, as esferas devem apresentar o mínimo de desgaste ou inferior ao combustível sem aditivos. Foram monitorados os parâmetros de acordo com a norma ASTM D 6079-04, norma que padroniza procedimentos adequados para ensaios de diesel no HFRR, de carga (N), velocidade de deslizamento relativo entre as superfícies de contato (m/s), distância de deslizamento acumulado (m) e a temperatura (°C), como mostra na Tabela 8 abaixo:

Tabela 8: Parâmetros norma (ASTM D 6079-04).

Temperatura do fluido (°C)	60 ± 2
Volume do fluido (mL)	2,0 ± 0,2
Comprimento do curso (mm)	1,00 ± 0,02
Frequência de oscilação(Hz)	50 ± 1
Umidade relativa (%)	> 30
Carga aplicada (N)	1,96 ± 0,01
Duração do ensaio (min.)	75 ± 0,1
Número de ciclos	225.000
Velocidade (m/s)	0,1
Distância de deslizamento total (m)	450

Fonte: Farias (2011)

3.4 Análise morfológica e química da esfera e do disco após ensaios no HFRR

A análise do desgaste teve como objetivo analisar a morfologia da superfície desgastada do disco. As escalas geradas nas esferas de aço foram examinadas pelo o microscópio óptico do sistema HFRR (Meiji Techno, modelo ML7000). As superfícies das escalas dos discos e as superfícies do corpo de prova desgastadas também foram analisadas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) na qual pertence ao Laboratório de de Caracterização do Departamento de Ciência e Engenharia dos Materiais da UFRN.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

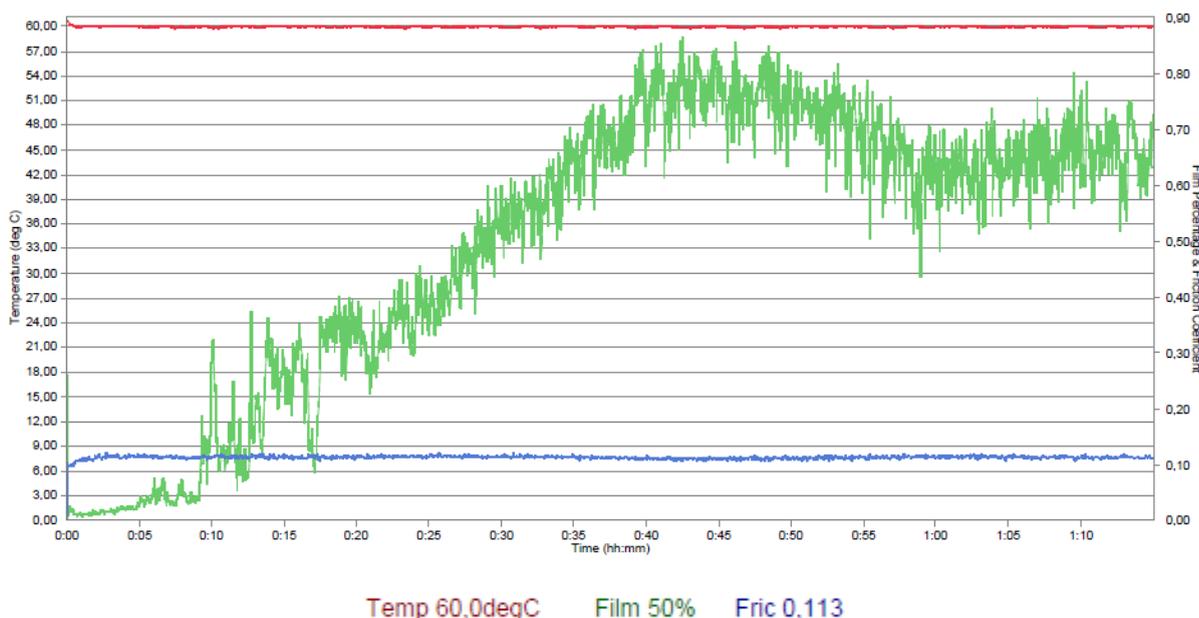
Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos no trabalho sobre o estudo tribológico do biodiesel obtido a partir do sebo bovino, através dos resultados sobre a viabilidade como biocombustível a partir do ensaio de lubricidade.

4.1 Ensaio de lubricidade HFRR do sebo bovino

Através da avaliação do desempenho tribológico do biodiesel de sebo bovino no equipamento HFRR, foi possível obter os resultados da sua lubricidade, levando em consideração tanto os coeficientes de atrito quanto a porcentagem de filmes formados e a temperatura, durante 75 minutos de ensaio.

A partir das informações obtidas pelo HFRR, foram obtidos três gráficos e apresentados nas Figuras 13, 14 e 15.

Figura 13: Gráfico do primeiro ensaio HFRR para o biodiesel de sebo bovino.



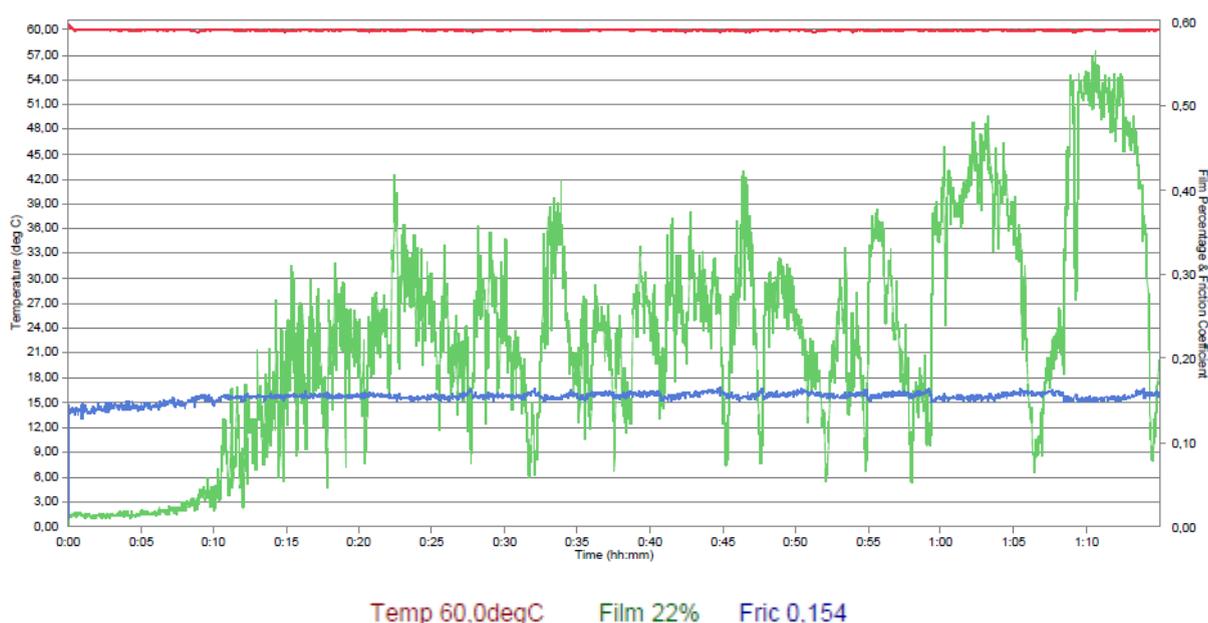
Fonte: Autor (2023).

Ao analisar a Figura 13, nota-se que a formação de filme acontece de forma crescente após os 10 min de ensaio, chegando a sua porcentagem máxima aos 45

min, em seguida observa-se um decréscimo, finalizando com uma porcentagem de aproximadamente 50%. Esse decaimento da espessura do filme, pode ser explicado, que com a evolução do ensaio, a pressão de contato da esfera com o disco começa a aumentar, fazendo com que a espessura do filme biodiesel de sebo bovino diminua.

Em relação ao coeficiente de atrito, como observado na Figura 13, manteve-se constante ao decorrer do ensaio, apresentando um valor relativamente baixo de 0,113. Dessa forma, o coeficiente de atrito nesse regime uniforme manteve-se a temperatura constante de 60°C durante os 75 minutos de análise.

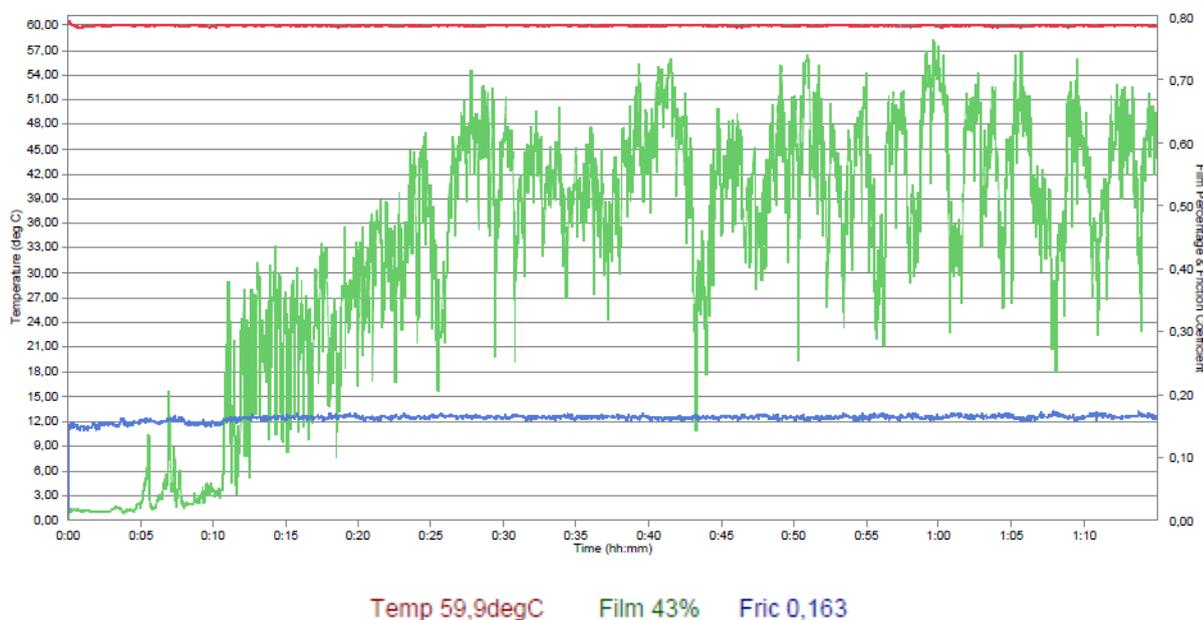
Figura 14: Gráfico do segundo ensaio HFRR para biodiesel de sebo bovino.



Fonte: Autor (2023).

Analisando o resultado do segundo ensaio na Figura 14, observa-se, no geral, um aumento sutil na formação de filme embora os percentuais estejam oscilando durante todo o curso de ensaio. Para o parâmetro do coeficiente de atrito, observa-se o mesmo comportamento constante, porém com o valor um pouco maior de 0,154, que o do primeiro ensaio, e também não ocorreu oscilação da temperatura.

Figura 15: Gráfico do terceiro ensaio HFRR para biodiesel de sebo bovino.



Fonte: Autor (2023).

Observando o gráfico da Figura 15, assim como os outros ensaios, após os 10 min a formação do filme começa a ser maior e com bastante oscilação chegando a uma porcentagem final de 43%, próxima ao resultado do primeiro ensaio. Já em relação ao coeficiente de atrito, com 0,163, apresentou o maior valor de todos os ensaios com temperatura constante de 59,9°C.

Ao analisar as Figuras 13, 14 e 15, foi demonstrado que durante o período inicial dos ensaios até por volta dos 10 min, não houve a formação de um filme estável. Isso ocorreu porque essa fase inicial é conhecida como "running-in", em que a rugosidade é ajustada, mas posteriormente há a formação de uma película protetora. (SILVA, 2018)

Percebe-se que a película do filme não consegue se manter permanente, fazendo com que o filme oscile bastante, como observamos nos três ensaios com porcentagens formação de filme variando 20 a 50%. Fazendo uma análise nos três resultados do coeficiente de atrito, nota-se que nos três ensaios ele foi constante durante os 75 minutos.

Se representarmos o resultado da observação da variável quantitativa sobre todos os resultados da formação de filme e coeficiente de atrito, por x_1, x_2, \dots, x_N , e o valor médio por μ , então podemos obter o desvio padrão a partir da expressão:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}{N}}.$$

Desta forma, obtemos um desvio padrão na formação de filme bastante considerável de aproximadamente 11,90%, e um desvio padrão do coeficiente de atrito de aproximadamente 0,038%, tornando-o quase irrelevante.

4.2 Análise das escaras apresentadas na esferas.

As lesões de pressão, denominadas escaras, são formadas pelo atrito entre o disco e a esfera. Essas lesões são indicativas da qualidade do fluido lubrificante, pois quanto menores forem as escaras, menor será o desgaste e maior será a eficácia do lubrificante. Através da análise da lubricidade do ensaio do HFRR, foi possível observar a extensão das lesões de desgaste causadas pelo ensaio no microscópio óptico, com uma ampliação de 100 vezes.

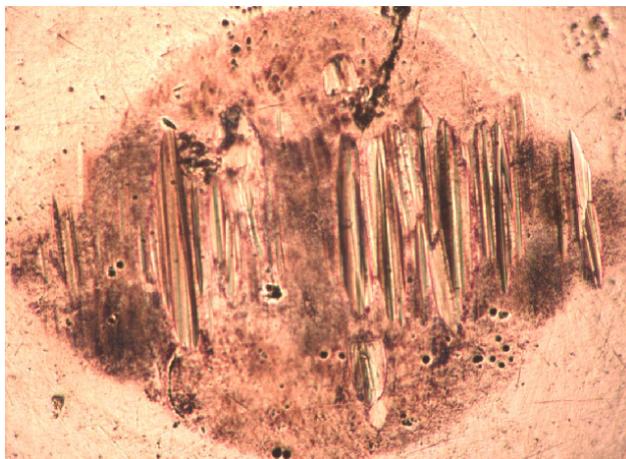
As imagens das Figuras 16, 17, 18 correspondem à escara de desgaste formada na superfície sofridas pelas esferas nos ensaios com a presença do biodiesel de sebo bovino, respectivamente:

Figura 16: Escaras do primeiro ensaio.



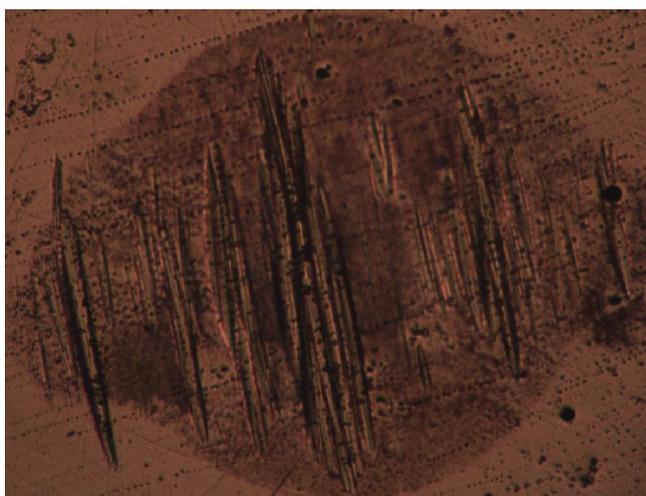
Fonte: Autor (2023).

Figura 17: Escaras do segundo ensaio.



Fonte: Autor (2023).

Figura 18: Escaras do terceiro ensaio.



Fonte: Autor (2023).

Tabela 9: Resultados do tamanho das escaras ocasionadas na superfície das esferas durante os três ensaios realizados no HFRR.

Ensaio	Eixo X	Eixo Y	Média de Desgaste
1	549 um	373 um	461,0 um
2	568 um	415 um	491,5 um
3	491 um	374 um	432,5 um

Fonte: Autor (2023).

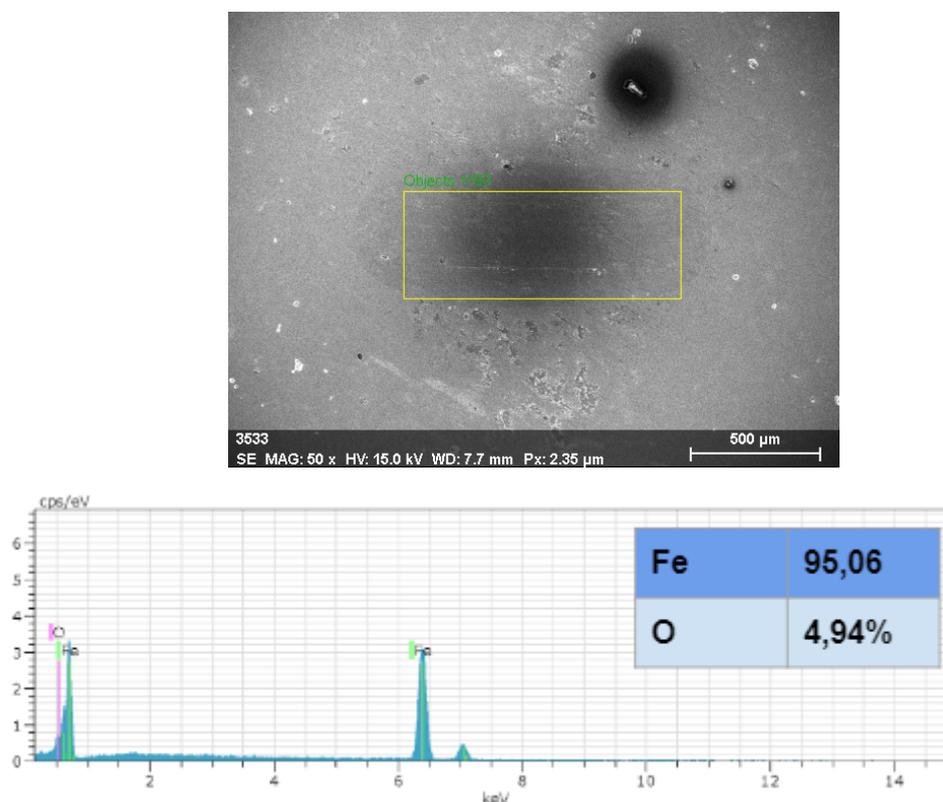
Percebe-se uma cor mais escura no resultado do terceiro ensaio, porém é referente ao foco no microscópio óptico que não teve uma boa resolução.

Fazendo uma análise nos resultados das escaras, podemos notar que a diferença entre os valores dos diâmetros das escaras não é tão expressiva, mostrando que o desgaste nas esferas teve um desvio médio de 461,67 μm . Pelo tipo e formato de escara pode sugerir que o desgaste ocorrido tenha sido abrasivo. O desgaste abrasivo ocorre devido à fricção entre a esfera e o disco, que é intensificada pela presença de partículas abrasivas no biodiesel de sebo bovino.

4.3 Análise de desgaste por EDS

As Figuras 19, 20, 21 apresentam os resultados das três análises no EDS, em diferentes regiões de análise do disco, dentro e fora da área de contato, após a execução do ensaio 2.

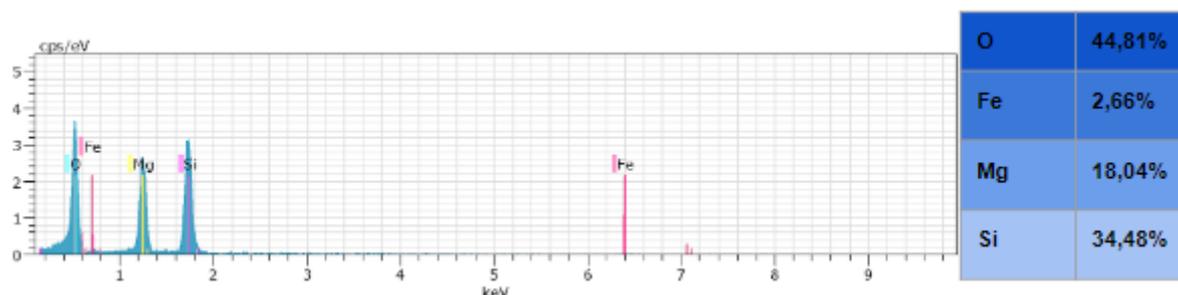
Figura 19: Análise “A” no EDS após segundo ensaio no HFRR. Aspectos topográficos e de composição dentro da zona de contato.



Fonte: Autor (2023).

Na Figura 19, observa-se uma mancha levemente escura e aparentemente esférica, com uma composição química em maior porcentagem o Ferro (Fe) 95,06%, devido a composição da liga de Aço SAE 1045 do disco, também apresenta uma baixa quantidade de oxigênio (O) com 4,94% podendo estar se associando a formação de óxido ou oriundo do processo de usinagem ou algum outro tipo de contaminação.

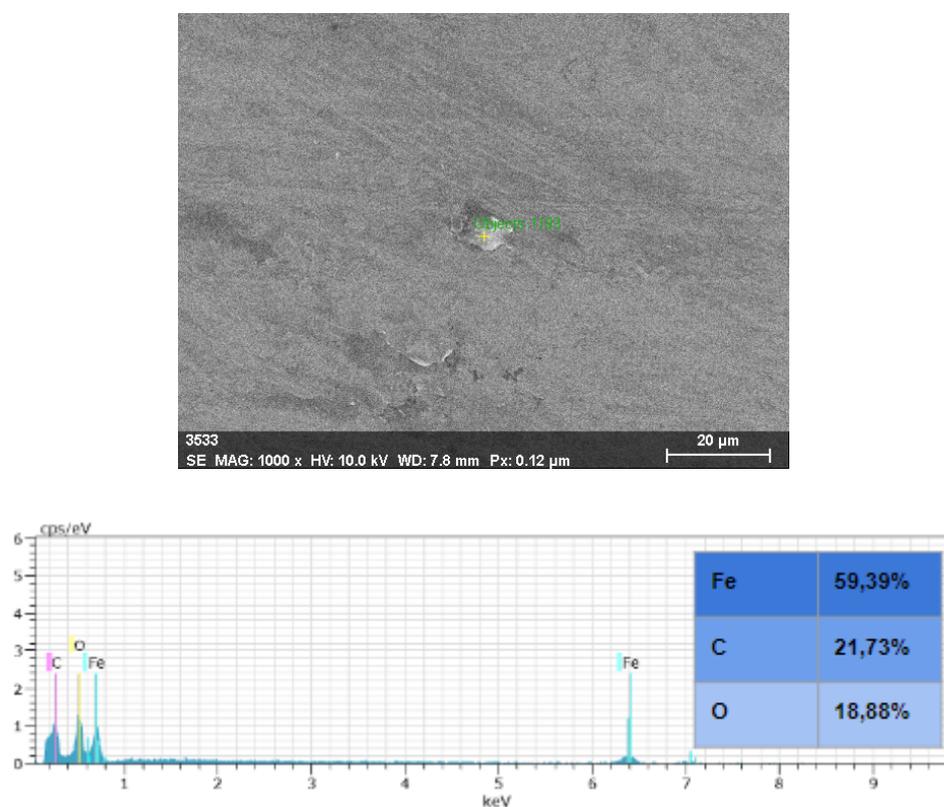
Figura 20: Análise “B” no EDS após segundo ensaio no HFRR. Aspectos topográficos e de composição fora da zona de contato.



Fonte: Autor (2023).

Na Figura 20, nota-se uma leve ponto escurecido, similar a um formato de grãos, e a presença dos elementos oxigênio (44,81%), ferro (2,66%), magnésio (18,04%) e silício (34,48%). Com exceção do oxigênio, que pode ter apresentado devido a formação de óxido, todos os outros elementos fazem parte da composição do Aço SAE 1045.

Figura 21: Análise “C” no EDS após segundo ensaio no HFRR. Aspectos topográficos e de composição fora da zona de contato.

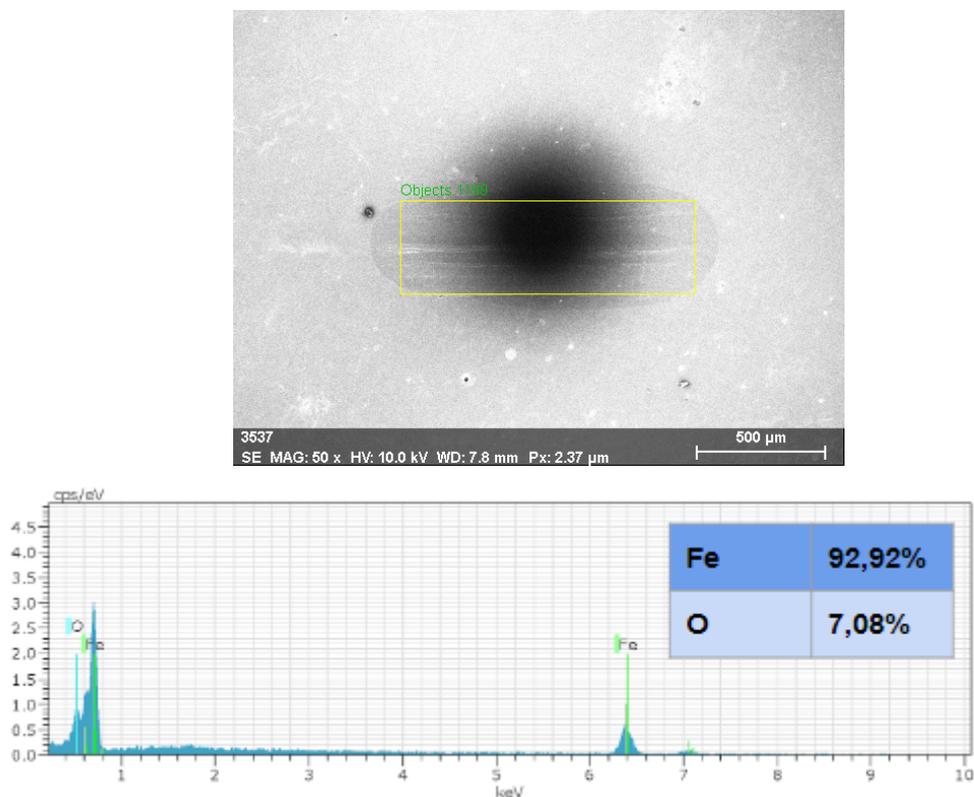


Fonte: Autor (2023).

A Figura 21 mostra a presença de um ponto com aspecto esbranquiçado e em sua composição mostra os elementos ferro (59,39%), carbono (21,73%) ambos da composição química do disco, e o oxigênio (18,88%).

Nas Figuras 22, 23, 24, apresentam os resultados das três análises no EDS, em diferentes regiões de análise do disco, dentro e fora da área de contato, após a execução do ensaio 3 no HFRR.

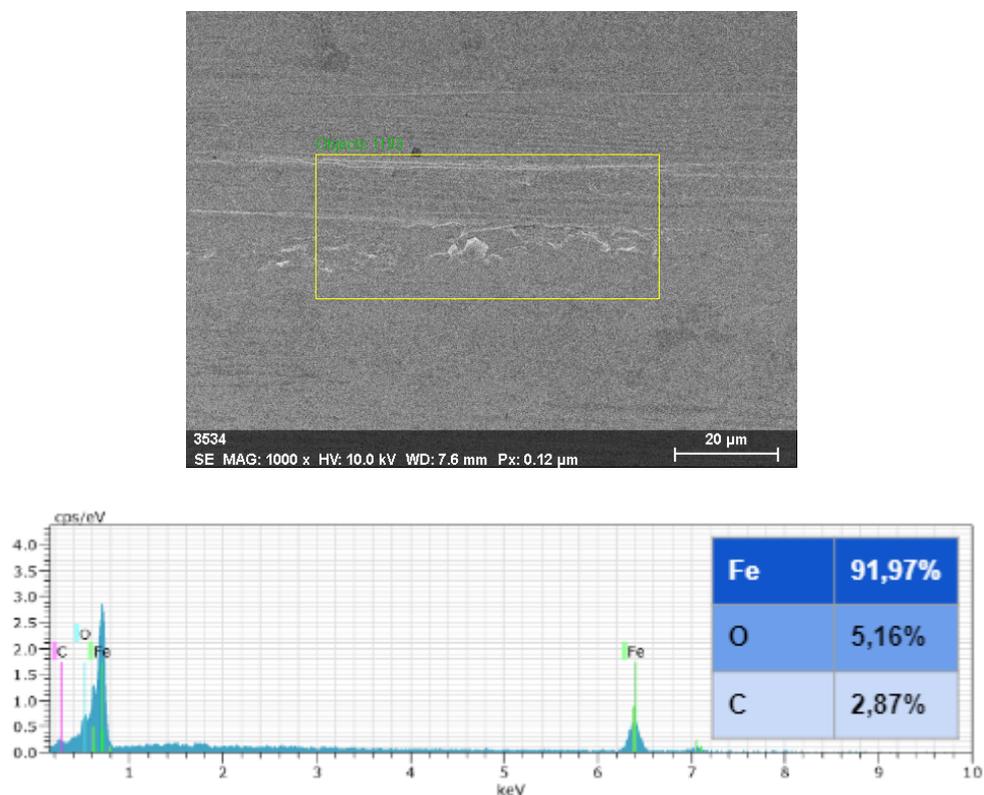
Figura 22: Análise “A” no EDS após terceiro ensaio no HFRR. Aspectos topográficos e de composição dentro da zona de contato.



Fonte: Autor (2023).

Na Figura 22, observa-se imagens topográficas da área de contato do segundo ensaio, com uma mancha em formato esférico, porém bem mais escura. Também apresentou a presença de dois elementos ferro (92,92%) e oxigênio (7,08%). Fe. em função da composição do aço disco SAE 1045 e o oxigênio estando relacionado com a formação de óxido.

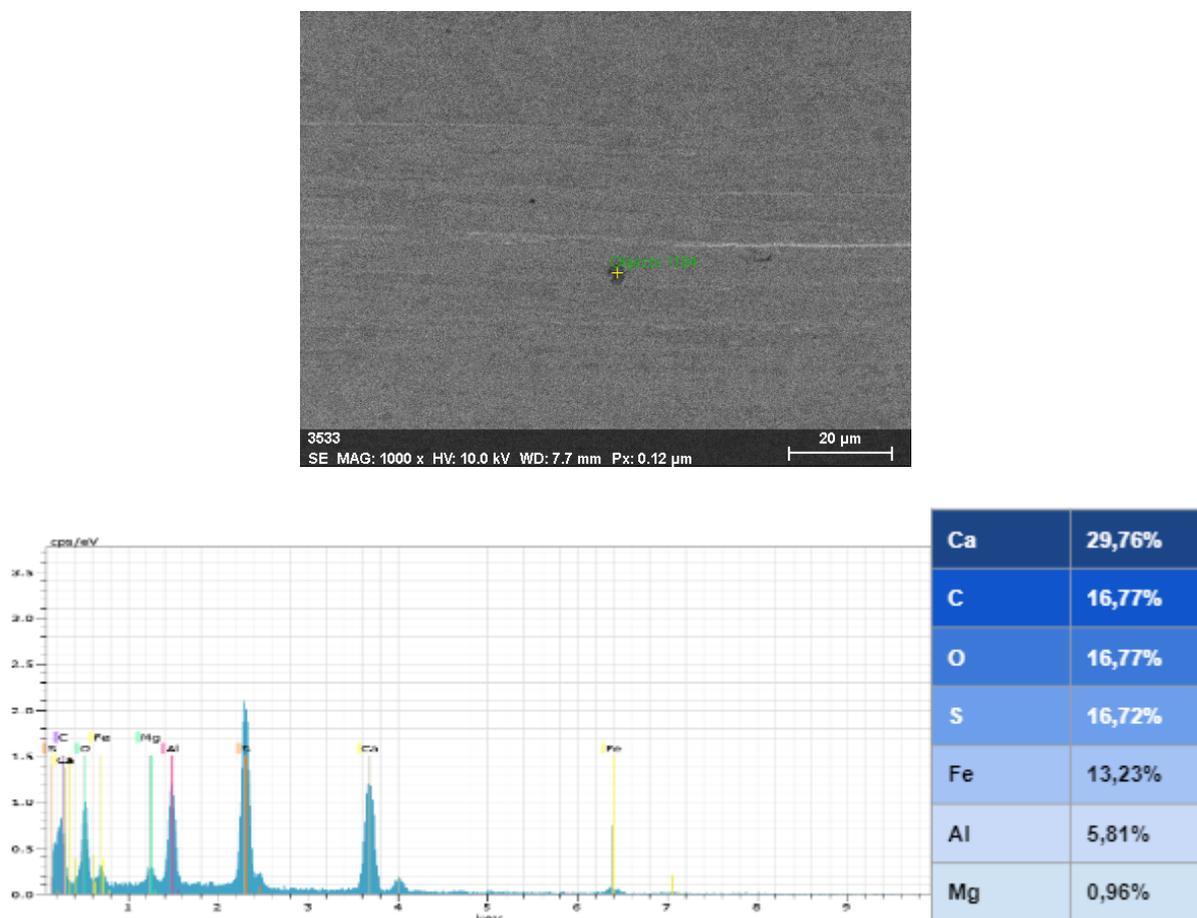
Figura 23: Análise “B” no EDS após terceiro ensaio no HFRR. Aspectos topográficos e de composição fora da zona de contato.



Fonte: Autor (2023).

Seguindo com a análise de resultados, na Figura 23, nota-se uma trilha de desgaste no disco com aspectos esbranquiçados e com ranhuras de formatos linearmente variados. Apresentando elementos de ferro (91,97%), carbono (2,87%) e oxigênio (5,16%).

Figura 24: Análise “C” no EDS após terceiro ensaio no HFRR. Aspectos topográficos e de composição fora da zona de contato.



Fonte: Autor (2023).

Na Figura 24, foi a que mais apresentou diferença dos outros resultados, no qual apresentou leves ranhuras lineares com aspectos esbranquiçados e em relação a elementos químicos, teve uma grande variedade presente: cálcio (29,76%), carbono (16,77%), oxigênio (16,77%), enxofre (16,72%), ferro (13,23%), alumínio (5,81%) e magnésio (0,96%). Tais elementos encontrados podem ser decorrentes tanto da composição do aço do disco como também da composição do biodiesel de sebo bovino.

5 CONCLUSÃO

Com relação a essa pesquisa, conseguimos concluir que:

- A partir das etapas do estudo tribológico das formulações, é possível concluir que:

As três variáveis medidas neste trabalho, que são o aquecimento do contato, o percentual de filme lubrificante no contato e o coeficiente de atrito, demonstraram ser sensíveis à evolução da escara, e portanto, são parâmetros que se correlacionam com a lubricidade do biodiesel.

Ao observar a formação de filme promovida pelo ensaio do HFRR, constatou-se que ele é bastante instável durante o tempo de ensaio e que não possuiu uma boa média entre os três resultados. Fazendo com que fosse ideal aumentar o número de ensaios para diminuir essa média e ter uma porcentagem mais precisa.

Em relação ao coeficiente de atrito, percebe-se que ele foi totalmente estável durante todo o ensaio e que teve uma pequena variação entre o resultado dos três experimentos.

- Ao analisar as escaras no disco, conclui-se que:

As escaras formadas na esfera, devido ao contato com o disco, nos três experimentos, de modo geral tiveram semelhança entre os três resultados. No qual o desgaste nos eixos X foram sempre maiores do que nos eixos Y, e assim apresentando um desgaste médio similar nos três experimentos. Sendo assim, como os resultados obtidos neste trabalho, não foi possível demonstrar uma eficiência na lubricidade do biodiesel de sebo bovino.

- Análise de EDS:

Observou-se a partir das análises de EDS que o mecanismo de desgaste abrasivo ocorreu predominantemente em todas as condições dos ensaios de lubricidade HFRR. No caso dos contracorpos lubrificadas com o biodiesel de sebo bovino, o desgaste foi caracterizado por abrasão.

Notou-se também que nas duas análises de EDS, apresentaram elementos químicos característicos dos materiais ou pertencentes ao biodiesel de sebo bovino.

Ambos os resultados apresentaram a presença de oxigênio nos discos, assim demonstrando o desgaste por corrosão.

SUGESTÕES

Realizar a avaliação do biodiesel produzido a partir do sebo bovino, caracterizando as suas propriedades físico-químicas, realizando ensaios de viscosidade, densidade, teor de água, teor de acidez, estabilidade de oxidação, afim de analisar e descrever a qualidade do biodiesel.

Efetuar um maior número de ensaios, fazendo com que tenha uma melhor avaliação de resultados e um menor desvio padrão entre eles.

Utilizar corpos de prova (esfera) e contracorpos (disco) de aço AISI 52100 do mesmo lote, poderia levar a resultados mais condizentes com o fluido em análise, uma vez que a variação na dureza dos aços seria mínima ou desprezível.

A avaliação de lubricidade de amostras de óleo diesel comum pode informar sobre as diferenças no comportamento tribológico em função do par esfera-disco. Seria necessário análises com o diesel puro e misturado ao biodiesel de sebo bovino, a fim de ter uma maior comparação e melhoria de resultados.

6 REFERÊNCIAS

ANP [Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis]. Biodiesel. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/biocombustiveis/biodiesel> acesso em: set. 2022.

BRUNETTI, Franco. **Motores de Combustão Interna**. São Paulo: Blucher, 2018. 554 p.

BRASIL. Resolução CNPE Nº 25/2021. Ministério de Minas e Energia. 2021. Disponível em: https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/conselhos-e-comites/cnpe/resolucoes-do-cnpe/resolucoes-2021/copy2_of_ResoluesCNPE252021.pdf. Acesso em: 13 setem. 2022.

Boog, J.H.F.; Silveira, E.L.C.; Caland, L.B.; Tubino, M. Determining the residual alcohol in biodiesel through its flash point. *Fuel* 2011, 90, 905.

Caland, L.B.; Silveira, E.L.C.; Tubino, M. Determination of sodium, potassium, calcium and magnesium cations in biodiesel by ion chromatography. *Analytica Chimica Acta* 2012, 718, 116.

EMBRAPA [Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária]. Soja. Disponível: <https://www.embrapa.br/soja/cultivos/soja1/dados-economicos> acessado em: 10 set. 2022.

MILCHESKI, Jonathan Luan, et al. Tribologia voltada para a indústria automotiva. *Revista Tecnológica da FATEC-PR*, v.1, n.12, p. 78 - 85, jan/jun, 2021.

OLIVEIRA FILHO, Manoel Fernandes de. **EFEITO DO BIODIESEL NO BICO INJETOR E NA EMISSÃO DE MATERIAL PARTICULADO EM MOTOR DO CICLO DIESEL**. 2016. 83 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mec Nica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

RADI et al., 2007, apud ALVES, Breno Bitencourt. Análise Tribológica de fluidos de corte elaborados a partir de óleos sae 20w 50 utilizando o ensaio de pino disco, 2019.

SANTOS, L. O.; MELO, G. F.; LAURENTINO, J. V. A.. Estudo e análise das principais e alternativas oleaginosas para produção de biodiesel: uma revisão integrativa. *Engineering Sciences*, v.9, n.2, p.81-99, 2021. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2318-3055.2021.002.0008>

SILVA, Leonardo Chagas da. **AVALIAÇÃO DO DESGASTE TRIBOQUÍMICO DE AGULHAS DOS BICOS INJETORES EM MOTORES DIESEL OPERANDO COM BIODIESEL**. 2015. 79 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mec Nica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015.

SIMÊNCIO, Éder Cícero Adão. **Motores de Combustão Interna**. Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S.A., 2019. 2018 p.

TILLMANN, C, A C. Motores de Combustão Interna e seus Sistemas

UDAETA, Miguel Edgar Morales; BAITELO, Ricardo Lacerda; BURANI, Geraldo Francisco; GRIMONI, José Aquiles Baesso. **COMPARAÇÃO DA PRODUÇÃO DE ENERGIA COM DIESEL E BIODIESEL ANALISANDO TODOS OS CUSTOS ENVOLVIDOS**. 2016. 8 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia, Engenharia de Energia e Automação Elétricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

VARELLA, C. A. A. Funcionamento dos motores de múltiplos cilindros. Apostila motores e tratores. Departamento de Engenharia. UFRRJ. 2010. 10 p.

VARÃO, L. H. R., ZAMORA, H. D. Z., SILVA, T. A. L., PASQUINI, D. VANTAGENS E LIMITAÇÕES DO SEBO BOVINO ENQUANTO MATÉRIA-PRIMA PARA A INDÚSTRIA BRASILEIRA DE BIODIESEL. HOLOS [en linea]. 2017, 7(), 39-54[fecha de Consulta 23 de Septiembre de 2022]. ISSN: 1518-1634. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=481554852005>

ZUNIGA, Abraham Damian Giraldo *et al.* **REVISÃO: PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DO BIODIESEL.** 2011. 18 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia, Universidade Federal do Tocantins (Uft), Curitiba, 2011.

MENEZES, Matheus Felipe Barbosa de *et al.* **Estudo dos efeitos dos aditivos no Biodiesel.** 2021. 25 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Química, Centro Universitário Una, Belo Horizonte - Mg, 2021. BRUNETTI, Franco. **Mecânica dos Fluidos.** 2. ed. Florianópolis: Pearson Prentice Hall, 2012. 431 p.

CASTRO, Fábio Daniel de; RAHDE, Sérgio Barbosa de. **Motores automotivos: evolução, manutenção e tendências.** Porto Alegre: Edipucrs, 2014.

MENEGHETTI, S. M. P.; MENEGHETTI, M. R.; BRITO, Y. C.. Transesterification, Some Applications and Biodiesel Production. **Revista Virtual de Química**, [S.L.], v. 5, n. 1, p. 63-73, 17 jan. 2013. Sociedade Brasileira de Química (SBQ). <http://dx.doi.org/10.5935/1984-6835.20130007>.

NEIVA, Matheus Oliva. **IMPACTO DAS PROPRIEDADES FÍSICOQUÍMICAS DE DIFERENTES MISTURAS DE BIODIESEL E DIESEL NO FUNCIONAMENTO DE MOTORES DO CICLO DIESEL.** 2022. 78 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Química, Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Rj, 2022. Disponível em: <https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/16476/1/MONEiva.pdf>. Acesso em: 25 jan. 2022.

ÇENGEL, Yunus A.; CIMBALA, John M.. **Mecânica dos fluidos: fundamentos e aplicações.** 3. ed. [S.I.]: Amgh, 2015. 970 p.

JACOB NETO, Arnaldo. **PROJETO DE MELHORIA DE BANCADA PARA ESTUDO TRIBOLÓGICO**. 2019. 61 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento Acadêmico de Mecânica - Damec, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2019. Disponível em: http://riut.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/16328/1/PG_DAMEC_2019_1_17.pdf. Acesso em: 05 jan. 2023.

CAVALCANTE, Kiara Souza dos Reis. **PRODUÇÃO DE BIODIESEL NO BRASIL: vantagens e desvantagens do óleo de soja e sebo bovino**. 2018. 111 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Agroenergia, Universidade Federal do Tocantins Campus Universitário de Palmas, Palmas (To), 2018.

RUPOLO, Willian. **CATALISADORES HETEROGÊNEOS NO PROCESSO DE TRANSESTERIFICAÇÃO PARA PRODUÇÃO DE BIODIESEL**: uma revisão sistemática. 2022. 46 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Química, Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território, Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2022.

FARIAS, Aline Cristina Mendes de. **Análise da Lubricidade do Biodiesel Brasileiro de Ésteres Etílicos de Soja e Girassol**. 2011. 143 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal – Rn, 2011.

SILVA, Maria Thereza dos Santos. **ESTUDO DO COMPORTAMENTO TRIBOLÓGICO DO LUBRIFICANTE MINERAL 15W40 CONTAMINADO POR BIODIESEL E SUAS MISTURAS COM DIESEL**. 2018. 86 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal – Rn, 2018.