

**Universidade de Brasília - UnB  
Faculdade UnB Gama - FGA  
Engenharia Automotiva**

**Avaliação do uso de bancada tribológica para  
análise de eficiência de óleo lubrificante  
contaminado com Biodiesel: Um estudo de caso**

**Autor: Matheus Avena da Cruz Antunes  
Orientador: Fábio Cordeiro de Lisboa**

**Brasília, DF**

**2024**



**Avaliação do uso de bancada tribológica para análise de eficiência de óleo lubrificante contaminado com Biodiesel.**

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Automotiva da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Automotiva

Universidade de Brasília – UnB  
Faculdade UnB Gama – FGA

Orientador: Prof. Dr. Fábio Cordeiro de Lisboa

Brasília - DF

Matheus Avena da Cruz Antunes.

/ Matheus Avena da Cruz Antunes – Brasília – DF. 2024 –  
51 p.: il.; 30 cm.

Orientação: Prof. Dr. Fábio Cordeiro de Lisboa

Monografia (Graduação) – Universidade de Brasília -UnB  
Faculdade UnB Gama - FGA, Brasília, 2024.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a todos que de alguma forma se fizeram presentes na elaboração do presente trabalho. Em especial a minha família e meus amigos. Sou muito grato pelo cuidado e suporte que recebi com tanto amor.

Meus pais e minhas irmãs são e serão parte de toda conquista minha, muito obrigado Maria Eduarda, Marcus Vinicius, Thaíssa e Maria Júlia.

Aos que vieram antes, muito obrigado pelo amor e incentivo, que este trabalho materialize o esforço de tantos. Obrigado aos meus avós, minhas tias e tios.

Agradeço o apoio fornecido por todos os profissionais da Universidade de Brasília, que com excelência garantiram segurança, alimentação, limpeza e muito zelo. Em especial, Professor Dr. Rhander Viana, Professora Dra. Carla Anflor, Danilo Oliveira e Jackson Paz pelo suporte acadêmico e técnico.

Agradeço ao professor Dr. Fabio Lisboa pela orientação.

## RESUMO

Neste trabalho, foi realizada uma revisão de literatura e estudos de caso para avaliar o uso do aparato experimental do Laboratório de Tribologia da Universidade de Brasília na análise do desempenho de óleos lubrificantes automotivos contaminados com biodiesel. O objetivo foi avaliar os recursos do laboratório e propor uma metodologia experimental e procedimento operacional padrão (POP) para essa análise. A revisão de literatura focou em estudos que utilizaram o laboratório em ensaios similares e em pesquisas sobre a contaminação de lubrificantes com biodiesel. Os resultados da literatura destacam a relevância do tema e a necessidade de ensaios que combinem diversos parâmetros para uma compreensão abrangente do impacto do biodiesel na infraestrutura automotiva atual. Com base na revisão, foi desenvolvida uma metodologia para ensaios do tipo pino-disco que serão realizados no Laboratório de Tribologia, integrando conhecimentos de estudos anteriores com os parâmetros necessários para a análise de óleos contaminados com biodiesel. Tanto a revisão quanto o estudo de caso indicam que a metodologia proposta valida o uso do equipamento disponível no laboratório, garantindo repetibilidade e precisão nos resultados.

**Palavras-chave:** contaminação, biodiesel, ensaio pino-disco.

## **ABSTRACT**

In this study, a literature review and case studies to evaluate the use of the experimental apparatus at the Tribology Laboratory of the University of Brasília for analyzing the performance of automotive lubricating oils contaminated with biodiesel. The objective was to assess the laboratory's resources and propose an experimental method along with a Standard Operating Procedure (SOP) for this analysis. The literature review focused on studies that used the laboratory for similar experiments and research on the contamination of lubricants with biodiesel. The findings from the literature highlight the importance of this topic and the need for experiments that integrate multiple parameters to provide a comprehensive understanding of the impact of biodiesel on current automotive infrastructure. Based on the review, a method was developed for pin-on-disk tests to be conducted in the Tribology Laboratory, combining insights from previous studies with the parameters required for analyzing biodiesel-contaminated oils. Both the literature review and the case studies show that the proposed method validates the use of the laboratory's equipment, ensuring repeatability and accuracy in the results.

**Keywords:** contamination, biodiesel, pin-on-disk test.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mecanismos de desgaste no motor. Fonte:(RATIU; MIHON; ARMIONI, 2020) .....	8
Figura 2-Mecanismo de desgaste adesivo. Fonte:(KETTERMANN, 2017) .....	9
Figura 3-Mecanismo de desgaste abrasivo. Fonte:(KETTERMANN, 2017) ...	10
Figura 4-Trinca sub-superficial propagando-se paralela à superfície do material. Fonte:(CUEVA, [s.d.]) .....	11
Figura 5- Mecanismos de desgaste por oxidação. Fonte:(TIER, 1998) .....	12
Figura 6 - Amostras - Disco e pino. Fonte: Pacheco, 2021. ....	17
Figura 7 - Posicionamento amostras. Fonte:(MARINHO; GUSTAVO; GALÁRRAGA, [s.d.]) .....	18
Figura 8 - Desenho esquemático ensaios lubrificadas. Fonte: O autor.....	19
Figura 9 - Célula de carga Fonte: (WJ COMPONENTS, [s.d.]) .....	19
Figura 10 - Termopar. Fonte: (PLANET SENSOR, 2017) .....	20
Figura 11 - Tribômetro Laboratório de Tribologia UnB Gama. ....	20
Figura 12 - Características dos ensaios. Fonte: O autor. ....	23
Figura 13 - Procedimento experimental. Fonte: O autor.....	25
Figura 14- Variação da força de atrito e da temperatura em função do tempo de ensaio. Ensaio a seco com carga de 10N. Fonte:(GUIMARÃES, 2022).....	31
Figura 15- Variação do coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio. Ensaio a seco com a carga de 10N. Fonte: (GUIMARÃES, 2022). ....	32
Figura 16- Superfícies desgastadas do disco e pino após ensaio a seco com 10N. Fonte: (GUIMARÃES, 2022). ....	33
Figura 17- Variação da força de atrito e da temperatura em função do tempo de ensaio. Ensaio lubrificado com óleo 5w40 com carga de 10N. Fonte: (GUIMARÃES, 2022).....	34
Figura 18- Variação do coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio lubrificado com óleo 5w40 e carga de 10N. Fonte:(GUIMARÃES, 2022) .....	34
Figura 19 - Superfícies desgastadas do disco e pino após ensaio lubrificado com óleo 5w40 e carga de 10N. Fonte:(GUIMARÃES, 2022) .....	35

Figura 20- Variação da força de atrito e da temperatura em função do tempo de ensaio. Ensaio lubrificado com Militec com carga de 10N. Fonte: (GUIMARÃES, 2022). .....	36
Figura 21 - Variação do coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio. Ensaio lubrificado com Militec a carga de 10N. Fonte:(GUIMARÃES, 2022) .	37
Figura 22- Superfície desgastada disco e pino após ensaio lubrificado com Militec com 10N. Fonte: GUIMARÃES, 2022.	37
Figura 23 - Curva de aquecimento. Fonte:(MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - BRASIL, 2019) .	44
Figura 24 - Monitoramento da concentração de diesel no óleo aquecido. Fonte: (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - BRASIL, 2019).....	44

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Especificações Célula de Carga. ....	19
Tabela 2 - Especificações termopar. ....	20
Tabela 3- Perda de massa do ensaio a seco com a carga de 10N.....	33
Tabela 4 - Perda de massa no ensaio lubrificado com óleo 5w40 com a carga de 10N. ....	35
Tabela 5 - Perda de massa no ensaio lubrificado com óleo 5w40 e Militec-1 com a carga de 10N .....	38
Tabela 6- Comparação entre os ensaios com carregamento de 10 N. Superfícies dos disco .....	38
<i>Tabela 7 - Comparativo perda de massa.</i> .....	39

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANFAVEA – Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis do Brasil.

API – American Petroleum Institute

ASTM – American Society for Testing and Materials

B10 – Diesel com 10% de biodiesel

B15 – Diesel com 15% de biodiesel

B20 – Diesel com 20% de biodiesel

CNPE – Conselho Nacional de Política Energética

COP – Conferência das Nações Unidas sobre Mudança no Clima

FGA – Faculdade UnB Campus Gama

NBR – Norma Brasileira

ONU – Organização das Nações Unidas

POP – Procedimento Operacional Padrão

SAE – Society of Automotive Engineers

SEEG - Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito

Estufa

TBN – Total Base Number

UnB – Universidade de Brasília

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 OBJETIVOS .....</b>	<b>3</b>
.1.1 Objetivo Geral .....	3
.1.2 Objetivos específicos.....	3
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>4</b>
2.12.1 Biodiesel .....	4
2.2 Contaminação de lubrificantes automotivos em motores a diese .....	7
2.3 Mecanismos de desgaste por deslizamento: .....	8
2.4 Lubrificação .....	12
2.5 Ensaio pino-disco .....	15
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>17</b>
3.1 Materiais.....	17
3.2 Métodos .....	18
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>27</b>
<b>5 CONCLUSÕES .....</b>	<b>46</b>
<b>6 TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>48</b>
<b>7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>49</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento tecnológico e industrial, em geral, perpassa pelo desenvolvimento de novos produtos, melhoria e otimização de produtos já inseridos no mercado e aprimoramento de processos de fabricação. A indústria automotiva se comporta de maneira similar, almejando a melhora da tecnologia automotiva empregada em serviços, produtos e segurança veicular.

De tal forma que, Iniciativas como o Programa 2030 – Mobilidade e logística (Lei Nº 13.75, 2018) instituído pelo Governo Federal brasileiro impulsionam o desenvolvimento da indústria automotiva em tópicos como incremento da eficiência energética, incremento da produtividade das indústrias e estímulo a produção de novas tecnologias e inovações.

Por certo, o tópico de eficiência energética é primordial tendo em vista os impactos negativos da indústria automotiva nas graves mudanças climáticas que enfrentamos. O Setor de transportes possui grandes desafios de sustentabilidade sendo responsável 20% das emissões de gases de efeito estufa, principalmente por conta do uso de combustíveis fósseis (SEEG, 2024).

Recentemente, nas discussões da 26ª Conferência do Clima da ONU, a COP 26, foram feitos diversos acordos e 24 países e grandes montadoras firmaram o compromisso de encerrar a produção de veículos até 2040 em mercados líderes. No entanto, atualmente no Brasil existem cerca de 60 milhões de veículos em operação dos quais, cerca de 74,4% são flex, 13,5% a gasolina, 11,5% são movidos a diesel e apenas 0,2% são híbridos e elétricos (Sistema de Gerenciamento de Frota do Sindipeças, 2023).

Sendo assim, o momento histórico atual enseja que mantenhamos as pesquisas e o desenvolvimento tecnológico que impacte positivamente a frota com as características atuais, ainda que no futuro tenhamos uma frota com maior quantidade de veículos elétricos e híbridos. Portanto, pesquisas que abordem a melhoria da eficiência energética de veículos movidos a combustão de combustíveis fósseis ainda são pertinentes e necessárias.

Dentro do campo de eficiência energética, pode-se ressaltar a contribuição expressiva da tribologia, ciência que se debruça a entender o comportamento de sistemas que possuam superfícies em movimento relativo (HUTCHINGS, 1992).

Estima-se que cerca de 23% do consumo global de energia seja causado por contatos tribológicos. Desses, 20% são gastos para superar a ação do atrito e os outros 3% na fabricação de componentes novos para substituir aqueles desgastados (HOLMBERG; ERDEMIR, 2017).

Usualmente, quando há superfícies em movimento relativo observa-se desgaste, ocorrendo em muitos casos perda progressiva de material e dano superficial, o que pode gerar decréscimo na vida útil de componentes, perda de precisão, aumento da vibração e até interrupção de funcionamento.

A estratégia mais comum para mitigar o desgaste é o uso de lubrificantes, majoritariamente óleos lubrificantes minerais formulados para controle oxidativo, resfriamento, limpeza e aumento da durabilidade dos motores.

A construção dos motores de combustão interna suscita um fenômeno chamado *Blow by* que nada mais é que a parcela de gases da combustão que passa pelos anéis dos pistões durante o funcionamento do motor, atingindo o cárter e a superfície do óleo lubrificante. Podendo gerar contaminação do lubrificante e consequente perda da eficiência do mesmo (BRUNETTI, 2012).

A perda de eficiência do lubrificante está intrinsecamente ligada ao aumento do consumo do lubrificante e atrelada a diminuição da vida útil do motor. Ambas as situações contribuem negativamente para melhora de indicadores de sustentabilidade.

Com foco na pesquisa de eficiência energética o presente trabalho se debruça no entendimento da eficiência de óleo mineral lubrificante contaminado com combustível.

## 1.1 OBJETIVOS

### .1.1 Objetivo Geral

Avaliar a possibilidade de emprego do aparato experimental do laboratório de tribologia da FGA UnB para determinação da eficiência do óleo lubrificante contaminado com Biodiesel.

### .1.2 Objetivos específicos

- Avaliar os recursos disponíveis no laboratório de tribologia da FGA UnB
- Propor uma metodologia experimental para a avaliação de desempenhos de óleos lubrificantes automotivos contaminados com biodiesel.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Neste capítulo são apresentados os tópicos relevantes na elaboração do presente trabalho. Dado que o trabalho discorre sobre a contaminação do óleo lubrificante de motores a diesel por combustível (diesel e biodiesel), o primeiro tópico teórico apresentado navega pelo mercado brasileiro de biodiesel e sua importância na indústria nacional, bem como as características do biodiesel.

Em seguida, é abordada a contaminação de lubrificantes em motores a diesel e seus desdobramentos, os principais tipos de lubrificantes e seu funcionamento. Discorre-se na sequência, sobre os parâmetros de eficiência de lubrificantes automotivos e os ensaios de desgaste que são empregados para avaliar tais parâmetros, por fim, são trazidos ao texto outros trabalhos similares.

### **2.12.1 Biodiesel**

O mercado nacional de biodiesel movimentou 7,34 milhões de m<sup>3</sup> em 2023 e por conta da resolução CNPE nº 3, de 20 de março de 2023, que determinou o aumento de percentual de biodiesel no óleo diesel. As diretrizes para a adição obrigatória foi a de 12% no ano de 2023 e 14% no ano de 2024. Tal aumento percentual levou no acumulado do ano, um aumento de 18,4% na produção nacional de biodiesel em 2023. Em comparação, a produção nacional de petróleo cresceu em 2023, no acumulado do ano, 11,4% (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - GOVERNO FEDERAL BRASIL, 2024).

O aumento da produção de biodiesel é comemorado por diferentes setores da indústria, uma vez que o biodiesel pode reduzir em 78% as emissões líquidas de gás carbônico, reduz em 90% as emissões de fumaça e elimina as emissões de óxido de enxofre. (HOLANDA; CÂMARA DOS DEPUTADOS, 2004).

O biodiesel é um biocombustível renovável de fonte não mineral, obtido pelo processo de transesterificação, que consiste na reação dos triglicerídeos presentes nos óleos vegetais e gordura animal com um álcool primário, metanol ou etanol. Desta reação são gerados dois produtos: o éster e glicerina. O éster, após processos de purificação e adição de aditivos de desempenho se torna o biodiesel comercializável (AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, 2024).

As principais fontes de biomassa para fabricação de biodiesel são óleo de soja (68%), gordura bovina (16,31%) e óleo de dendê (3,22%). Os demais materiais graxos compõem o percentual das matérias primas para biodiesel. É possível fazer misturas dos ésteres de fontes diferentes para obtenção de biodiesel (AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO (ANP), 2018).

A primeira legislação que estabeleceu a obrigatoriedade da adição de biodiesel no diesel comercial foi a Lei nº 11.097 de 2005, tendo como norte o incremento, econômico, social e ambiental da participação de biocombustíveis na matriz energética nacional. A lei trazia a obrigatoriedade da adição de até 5% de biodiesel em volume de diesel comercializado em todo território nacional.

A lei nº 11.097 foi um marco histórico que auxiliou o Brasil a se tornar o terceiro maior produtor de biodiesel do mundo. Outra legislação que é um marco é a Lei nº 13.576 de 2017 que institui a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) com diversos objetivos, dentre eles atendimento dos compromissos feitos no acordo de Paris sob a Convenção da ONU sobre mudança do clima, redução de emissões de gases causadores do efeito estufa e expansão da produção e do uso de biocombustíveis na matriz energética nacional.

A Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) tem o papel regulador no mercado brasileiro de biodiesel e regulamenta o percentual de biodiesel no diesel, avalia as plantas das usinas de biodiesel e concede autorização para seu funcionamento. Já o Conselho Nacional de Política Energética - CNPE, atua como órgão de assessoramento da Presidência da República para formulação e diretrizes de energia. O CNPE determina o percentual de biodiesel no diesel segundo os critérios:

- a disponibilidade de oferta de matéria-prima e a capacidade industrial para produção de biodiesel;

- a participação da agricultura familiar na oferta de matérias-primas;
- a redução das desigualdades regionais;
- o desempenho dos motores com a utilização do combustível;
- as políticas industriais e de inovação tecnológica;

O critério de desempenho dos motores é de muito interesse, pois na medida em que se aumenta o percentual de biodiesel no diesel, deve-se pesquisar e compreender os efeitos positivos e negativos nos motores em operação e os que serão fabricados. Diversos pesquisadores se debruçaram para entender aspectos do aumento e destaca-se o Grupo de Trabalho para Testes com Biodiesel, instituído pela portaria do Ministério de Minas e Energia nº262 de 2016 que uniu esforços de setores públicos e privados durante três anos para a elaboração do Relatório de consolidação dos testes e ensaios para uso do biodiesel.

Publicado em 2019, o relatório contou com participação de 14 fabricantes, da Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (ANFAVEA) e de representações dos fabricantes de biodiesel. O relatório expôs diferentes visões quanto ao emprego do diesel B15 e apesar do texto trazer que há um parecer geral favorável ao aumento do uso de biodiesel a ANFAVEA não recomenda o aumento do teor de biodiesel no diesel comercial (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - BRASIL, 2019).

Dentre os motivos para a não recomendação da ANFAVEA, destaca-se que há aumento do custo operacional, gerado pelo aumento da periodicidade da troca de óleo e filtros, aumento do consumo de combustível e desgaste excessivo dos componentes metálicos do motor. A associação também apontou motivos relacionados a impactos ambientais, qualidade do combustível e segurança para o usuário com a parada repentina devido a falha de sistema (entupimento de filtro, entupimento de injetores).

A resolução mais recente sobre o tema é a Resolução CNPE Nº 3 de 20/03/2023 que estipula o incremento de biodiesel de 13% em 2024, 14% em 2025 e 15% em 2026. Aumentos que trazem preocupação de diversos setores da sociedade civil, haja vista os resultados divergentes dos testes com B15 e B20.

## 2.2 Contaminação de lubrificantes automotivos em motores a diesel

O desenvolvimento de motores de combustão interna só foi possível após o entendimento e emprego de lubrificantes. O principal papel do óleo lubrificante em motores é assegurar que as partes em movimento relativo não sofram desgaste proveniente de atrito excessivo. A lubrificação também atua no resfriamento de peças e sistemas, auxilia na vedação entre pistão, cilindros e anéis. Também protege peças contra corrosão e ferrugem, limpa e facilita a eliminação de produtos da combustão. (RATIU; MIHON; ARMIONI, 2020)

O desempenho adequado do sistema de lubrificação é essencial para o bom funcionamento de motores de combustão interna. Faz-se necessário, que haja a presença adequada de óleo lubrificante em característica e quantidade adequada. Bem como controle correto da pressão de contato entre as superfícies e das folgas específicas entre as peças. Caso tais parâmetros apresentem anomalias o motor pode sofrer danos, perda de desempenho e oscilações drásticas de funcionamento (BRUNETTI, 2012).

O sistema de lubrificação mais comum em motores de combustão interna é o sistema de lubrificação sob pressão. Trata-se de um sistema que através de uma bomba, desloca óleo do cárter para todos os componentes móveis do motor. Lubrificando mancais, bielas, pistões, comando de válvulas, engrenagens de sincronização e acessórios do motor. As paredes dos cilindros são lubrificadas pelo óleo que "escapa" dos mancais principais e por orifícios dentro dos pistões (BRUNETTI, 2012).

Durante seu funcionamento, o óleo lubrificante do motor acaba se contaminando tanto por agentes internos, quanto por agentes externos ao motor, entrando em contato com contaminantes inseridos no processo de manufatura das peças e contaminantes vindos dos processos de manutenção (RATIU; MIHON; ARMIONI, 2020).

Durante a partida a frio e regimes de funcionamento intermitentes (stop-and-go), o combustível não vaporizado se condensa nas paredes das camisas dos pistões e é levado para o cárter pelos raspadores dos cilindros. No cárter, o combustível entra em contato com o óleo lubrificante do motor e o contamina, alterando suas

propriedades e podendo iniciar ou intensificar mecanismos de desgaste nos componentes do motor. (S. M. SHANTA; G. J. MOLINA; V. SOLOIU, 2011).

### 2.3 Mecanismos de desgaste por deslizamento:

Os mecanismos clássicos de desgaste podem ser observados em motores de combustão interna que por diversas razões enfrentem condições de operação que favoreçam o desgaste, tais como perda da eficiência do óleo lubrificante, desbalanceamento de sistemas, perda de geometria de peças e excesso de temperatura. Dentre os mecanismos de desgaste, os mecanismos por deslizamento são muito frequentes por conta do movimento relativo de componentes do motor como pistões e mancais. Pode-se observar na **Error! Reference source not found.** os mecanismos de desgaste mais comuns em motores de combustão interna.

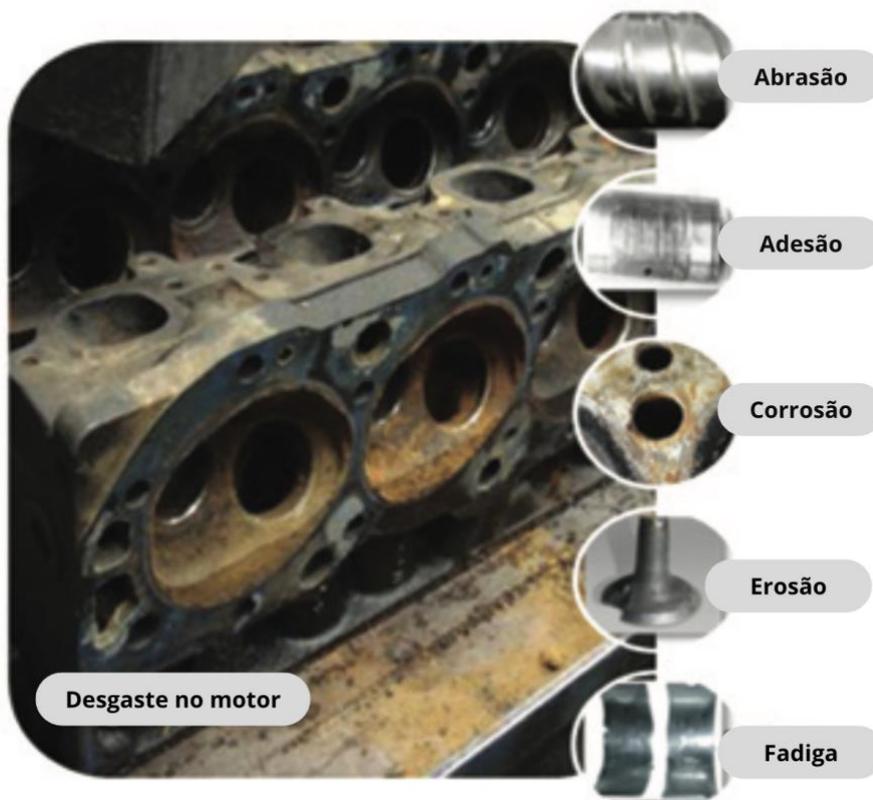


Figura 1 - Mecanismos de desgaste no motor.  
Fonte:(RATIU; MIHON; ARMIONI, 2020)

A adesão no desgaste por deslizamento ocorre quando há ligação dos materiais unindo as superfícies, ligação oriunda das interações moleculares entre os materiais. Quando essas ligações se opõem ao sentido do movimento relativo entre as superfícies ocorre deformação, geralmente ocorrem deformações plásticas que podem gerar trincas, ganho ou perda de material (KETTERMANN, 2017).

A adesão ocorre nas interações moleculares entre as asperezas, sendo caracterizadas segundo as ligações químicas: covalente, iônica, metálicas ou de Van der Waals. O calor gerado nesta interface favorece tais ligações, como a adesão acontece entre as asperezas sua área de contato é muito pequena, muitas vezes menor do que as dimensões da peça, gerando altas pressões. A natureza química do material é um componente decisivo neste mecanismo. É possível observar na Figura 2 que: as asperezas em contato se aderem e o movimento faz com que haja deformação plástica e consequente ruptura, causando uma cratera em uma superfície e um ressalto irregular na outra (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2005).

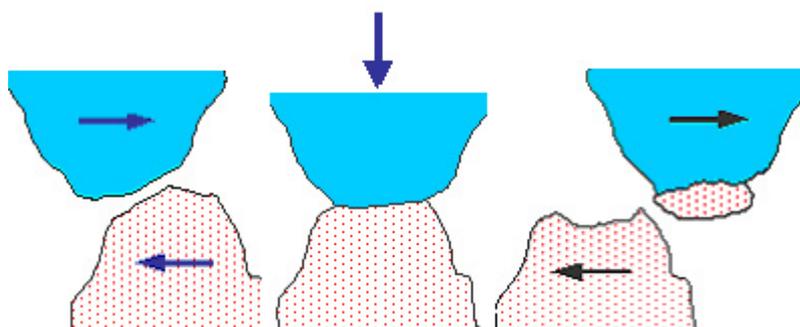


Figura 2-Mecanismo de desgaste adesivo.

Fonte:(KETTERMANN, 2017)

As formas de reduzir o desgaste adesivo envolvem manter uma superfície ou um filme de lubrificante entre os materiais, evitando o contato entre as asperezas, bem como entender a natureza química dos materiais utilizados e reduzir a temperatura na região de desgaste (KETTERMANN, 2017)

A interface entre as peças pode conter partículas que interagem com ambas as superfícies, mudando a dinâmica dos fatores envolvidos no desgaste. Partículas estas de dureza maior ou igual a das superfícies, podendo ser de materiais duros removidos dos corpos durante o desgaste, óxidos ou impurezas. Uma partícula removida da superfície durante o desgaste passa por um processo de deformação plástica que a

encrua tornando-a mais dura que a superfície da qual foi removida. A interface desse mecanismo é complexa e possui seus próprios mecanismos de desgaste (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2005).

O desgaste abrasivo pode produzir sulcos orientados na direção de deslizamento, similares a sulcos gerados por um lixamento feito em uma só direção, na Figura 3 pode-se observar este mecanismo.

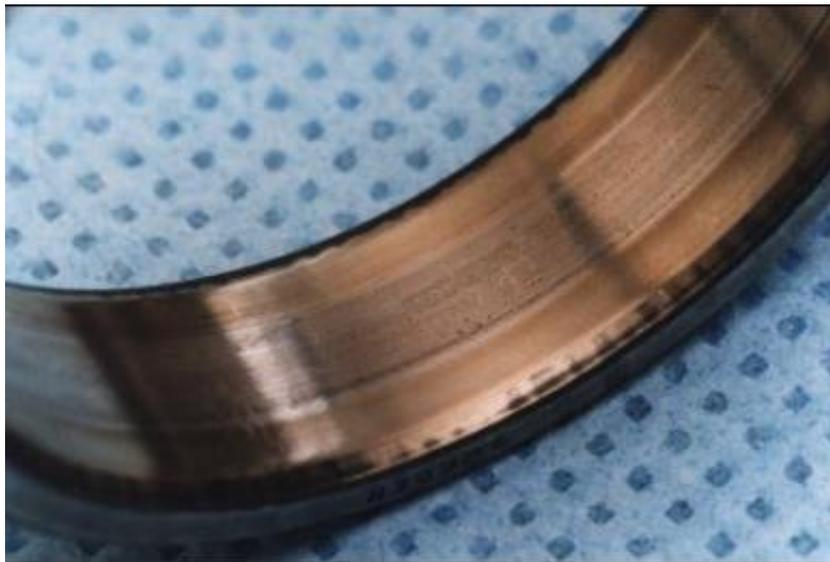


Figura 3-Mecanismo de desgaste abrasivo.

Fonte:(KETTERMANN, 2017)

A redução do desgaste abrasivo perpassa o emprego de lubrificantes que permitam a saída dessas partículas ou que estas partículas não entrem em contato com as superfícies em movimento relativo, seleção de material, tratamentos térmicos e revestimentos também podem ser empregados (KETTERMANN, 2017).

A norma ASTM E1823-13 define o mecanismo da fadiga como:

*“é o processo de mudança localizada, permanente e progressiva na estrutura, que ocorre no material sujeito a flutuações de tensões e deformações que pode culminar em trincas ou completa fratura depois de um número suficiente de flutuações”, (ASTM, 2023).*

Componentes que sofrem esforços cíclicos inicialmente não apesentam danos superficiais como podemos observas nos outros mecanismos de desgaste, o desgaste

só começa a ser notado depois de um certo número de ciclos, as tensões cíclicas levam a nucleação e propagação de trincas ou fraturas, semelhantes à fadiga convencional, geralmente trincas sub-superficiais que se propagam paralelas à superfície do material. Pode-se observar a característica da trinca na Figura 4.(RIBEIRO; VENTRELLA; GALLEG0, 2005)

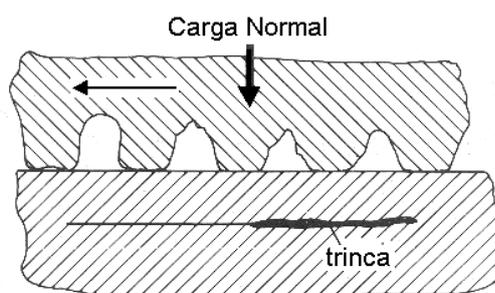


Figura 4-Trinca sub-superficial propagando-se paralela à superfície do material.

Fonte:(CUEVA, [s.d.]

O mecanismo de desgaste por oxidação ocorre pela remoção contínua de camadas de óxidos como resultado do contato deslizante entre asperezas, sendo considerado um desgaste moderado. Camadas de óxido são formadas em atmosferas corrosivas, especialmente em líquidos e gases corrosivos, ou em materiais inoxidáveis.

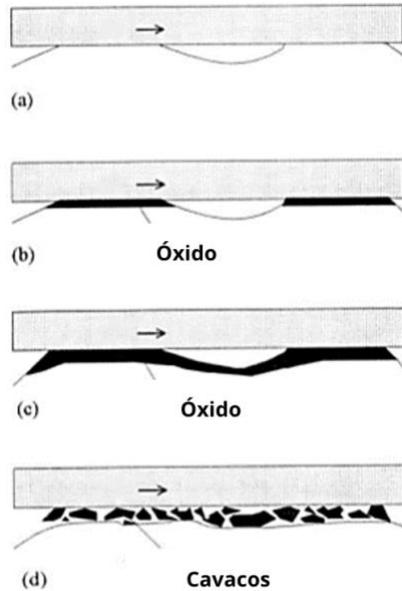
No desgaste por oxidação as camadas de óxido são quebradas pelas asperezas vindas da superfície que desliza sobre a superfície que possui esta camada de óxidos, as asperezas com maior dureza rompem a camada de óxido e quebram as asperezas dessa camada (BAYER, 2019).

A taxa de formação de óxidos e a taxa de remoção desses óxidos definem como o desgaste acontecerá. A temperatura tem grande influência sobre este mecanismo, materiais que apresentam transformações alotrópicas podem formar óxidos diferentes em função da mudança de temperatura (BAYER, 2019).

Este mecanismo é relacionado a reatividade química, sendo mais significativa em metais do que em outros materiais, entretanto, o mecanismo de desgaste por oxidação foi encontrado em cerâmicas.

Nota-se na Figura 5 as etapas dos mecanismos de desgaste por oxidação, primeiramente tem-se um plano, no qual as superfícies se movimentam entre si,

posteriormente há o contato da camada de óxido com a superfície, e então a camada de óxido se quebra e forma partículas (debris).



(a) Formação de um plano. (b) Formação de óxido sobre o plano.  
(c) Expansão do óxido. (d) Filme de óxido se rompe para formar cavaco de desgaste.

Figura 5- Mecanismos de desgaste por oxidação.

Fonte:(TIER, 1998)

## 2.4 Lubrificação

O dimensionamento e especificações do sistema de lubrificação de motores é complexo, principalmente por conta da faixa de temperatura na qual o motor opera, de temperaturas muito baixas na partida a muito altas durante o funcionamento.

As principais funções de lubrificantes no motor são:

- Redução do atrito: O lubrificante promove a separação de superfícies ao formar um filme de óleo entre as superfícies, reduzindo o atrito.

- Refrigeração: O óleo lubrificante atua como meio de transferência de calor, o calor é transferido para o óleo e resfriado pelo sistema de arrefecimento.

- Limpeza: O óleo tem a capacidade de remover partículas de resultantes da combustão e mantê-las em suspensão no óleo. E na troca periódica do óleo, as partículas são retiradas do motor.

- Proteção contra corrosão: Os lubrificantes modernos possuem aditivos que protegem as superfícies de ações corrosivas como a oxidação química.

- Vedação: Na câmara de vedação o lubrificante atua como agente de vedação, impedindo a saída de lubrificante e a entrada de contaminantes externos.

Existem diversos tipos de lubrificantes automotivos, mas será dado enfoque aos lubrificantes líquidos utilizados em motores de combustão interna do ciclo Diesel, do tipo mineral multiviscoso que é obtido a partir da destilação do petróleo e aditivado com agentes anticorrosivos, antiespessantes, antiespumantes, dispersantes, antiespumantes, aditivos de extrema pressão, modificadores de atrito e detergentes (KIMURA, 2010).

As principais propriedades dos óleos são:

- Viscosidade;
- Índice de viscosidade;
- Ponto de fluidez;
- Oleoginosidade ou oleosidade;
- Proteção da corrosão;
- Espuma;
- Emulsão;
- Detergência;

A viscosidade pode ser entendida como a menor ou maior resistência ao escoamento do óleo, quanto maior a viscosidade, menor será a velocidade com que o fluido escoar. Em geral, a viscosidade de fluidos muda de acordo com a temperatura, diminuindo com o aumento da temperatura. Em óleos lubrificantes automotivos a viscosidade é parâmetro fundamental e frequentemente apresenta um determinado comportamento de viscosidade para temperaturas frias e para temperaturas quentes.

O índice de viscosidade de um óleo é um valor estabelecido empiricamente que relaciona a variação da viscosidade com a temperatura e a variação de viscosidade de dois óleos adotados como padrão. O índice de viscosidade pode ser determinado a partir de tabelas normalizadas como na NBR 14358:2012.

O índice de viscosidade pode ser melhorado com o emprego de aditivos de polímeros de alta massa molecular com cadeia principal flexível, a estrutura dos polímeros muda de acordo com a temperatura compensando a mudança de viscosidade do óleo.

Ponto de fluidez é a menor temperatura que o óleo é capaz de fluir por efeito da gravidade e é diminuída pelo processo de refino. O correto controle do ponto de fluidez é crucial para que o lubrificante selecionado não tenha consistências pastosas na condição de operação selecionada.

Oleoginiosidade ou oleosidade é a capacidade aderente do lubrificante às superfícies metálicas, não há uma escala para essa característica e em geral óleos com maior oleosidade tem melhores resultados em desgastes por deslizamento dada a aderência de moléculas às superfícies metálicas.

O lubrificante deve ter capacidade anticorrosiva e não ser corrosivo, os lubrificantes minerais, se não estiverem contaminados, não são corrosivos para a metais empregados em maquinário comum, no entanto, óleos minerais oxidam com o tempo e se tornam corrosivos pela presença de [ácidos orgânicos, sendo corrosivos em especial para ligas que contenham chumbo.

O processo de formação de espuma em óleos lubrificantes expõe o óleo ao ar, acelera a oxidação e reduz a quantidade de lubrificante nos componentes. Óleos refinados, reforçados com agentes antiespumantes e com alto Índice de viscosidade formam menos espuma e só espumam na presença de contaminantes.

A emulsão ocorre quando gotículas de água ficam presas no óleo e é característica desejável em fluidos de corte e lubrificação industrial, porém em motores, óleos com alta emulsibilidade podem favorecer a corrosão de componentes, sendo comum portanto, o uso de antiemulsificantes nos óleos lubrificantes automotivos.

A capacidade de detergência é interessante porque em motores, a combustão frequentemente deposita resíduos da queima e o lubrificante com capacidade detergente consegue dissolver esses depósitos e na troca periódica substituímos o óleo que contém os resíduos por um óleo novo, removendo os resíduos do motor.

## 2.5 Ensaio pino-disco

Uma das formas de medirmos a eficiência de lubrificantes é usar comparativamente ensaios de desgaste e observar o desempenho de cada lubrificante na redução do desgaste, redução do coeficiente de atrito, temperatura, vibração e outros parâmetros. A norma da *American Society for Testing and Materials* (ASTM, 2000)– 95a descreve um Método de Teste Padrão para teste de desgaste com um aparelho pino-disco, o método de teste descrito é usado para determinar no laboratório o desgaste de materiais durante o deslizamento, podendo também determinar o coeficiente de atrito.

A norma indica que duas amostras são necessárias para a realização do teste, um pino perpendicular a um disco plano. A máquina de teste faz com que amostra do pino gire sobre a amostra do disco ou que a amostra do disco gire sobre a amostra do pino, em ambos os casos a trilha de desgaste é um caminho circular. O plano do disco pode ser horizontal ou vertical.

A amostra de pino é pressionada contra o disco com uma carga específica, constante ou variada. A carga geralmente é transferida por meio de uma alavanca, braço com pesos, de forma hidráulica ou pneumática.

Os resultados de desgaste observados são relatados como perda de volume, no disco e pino separadamente, resultados decorrentes da análise da superfície das amostras, como mudança dos parâmetros de rugosidade, mudança da dureza e demais característica superficiais das amostras.

Os resultados são obtidos através da realização do teste para uma distância de deslizamento selecionada e cargas escolhidas, a distância de deslizamento pode ser indicada pela escolha de um determinado tempo de ensaio.

A norma indica as características das amostras, descreve o aparato experimental, amostras de teste e preparação de amostras, parâmetros de teste, procedimento padrão do ensaio e cálculos e relatórios.

O aparato experimental mais comum consiste em um eixo, que sustenta a amostra do disco, e a rotaciona em seu eixo por um motor, o conjunto conta também com um braço alavanca capaz de pressionar o pino contra o disco com uma carga específica.

O aparato pode possuir uma célula de carga medindo a força de atrito e sensores medindo a temperatura, o motor deve ser capaz de manter uma velocidade constante, de 60 rpm a 600 rpm e deve conter um contador de revoluções ou contador de tempo.

O procedimento do teste pode ser aplicado a diversos materiais, os requisitos descritos na norma são: que o material possibilite a fabricação de amostras com dimensões específicas, que podem ser repetidas e que possibilite amostras que suportem as tensões exercidas durante o ensaio sem falhas ou flexões excessivas.

Os diâmetros dos pinos variam entre 2 e 10 mm e o disco entre 30 e 100 mm, as dimensões podem ser alteradas desde que atendam aos requisitos citados acima, a preparação das amostras deve evitar danos superficiais que possam comprometer o ensaio.

Os parâmetros de teste descritos na norma são:

- Carga
- Velocidade
- Distância
- Temperatura
- Atmosfera

A carga em valores da força em Newton no contato, a velocidade relativa de deslizamento entre as amostras (m/s), a distância de deslizamento percorrida no ensaio, a temperatura das amostras próximas das áreas onde acontece o contato e atmosfera (ar ou gás escolhido, argônio por exemplo, lubrificantes, umidade relativa do ar) ao redor do contato.

O procedimento descrito na norma indica a necessidade de que o teste possa ser repetido com as mesmas condições, tomando cuidado por exemplo: na preparação das amostras, limpando-as antes do ensaio, na medição das amostras antes e depois do ensaio, no ajuste da velocidade do motor, entre outros.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Materiais

Os materiais usados nos ensaios foram escolhidos com base nos trabalhos de Guimarães e Pacheco, realizados no laboratório de tribologia da Universidade de Brasília – Campus Gama.

Na realização dos ensaios as amostras foram de Aço SAE 1045 (Figura 6), os discos foram usinados nas dimensões: diâmetro de 19 mm e comprimento de 20 mm. Já os pinos foram usinados com 60 mm de diâmetro e 20 mm de espessura.



*Figura 6 - Amostras - Disco e pino.  
Fonte: Pacheco, 2021.*

Lubrificante selecionado para os ensaios foi o óleo mineral Turbo Diesel E700, SAE 15W40 e API CI- 4 da Valvoline, indicado para segmento rodoviário, frota de ônibus, turboalimentados e superalimentados (VALVOLINE, 2023).

## 3.2 Métodos

### 3.2.1 Tribômetro

O equipamento que será utilizado nos ensaios foi desenvolvido por (MARINHO; GUSTAVO; GALÁRRAGA, [s.d.]) segundo a norma ASTM G99 (ASTM, 2000). O tribômetro é operado no Laboratório de Tribologia da Faculdade UnB Gama.

O tribômetro é construído de forma a suportar ensaios do tipo contato conforme e do tipo não conforme, com possibilidade de regulação para amostras do tipo pino disco com diferentes geometrias. O equipamento possui um motor de indução elétrico de ½ cv, que possibilita o uso de inversores de frequência para controle da velocidade de rotação. O motor é conectado ao sistema de polias que transmite a rotação do eixo do motor para o eixo que suporta o disco. O dispositivo conta também com eixo para carregamento do ensaio e contrapesos para ajuste e equilíbrio do sistema (PACHECO, 2022).

A disposição do disco é vertical e o pino é ajustado no topo do disco em posição perpendicular ao eixo do disco. Como ilustrado na Figura 7.



*Figura 7 - Posicionamento amostras.*  
*Fonte:(MARINHO; GUSTAVO; GALÁRRAGA, [s.d.])*

O equipamento possui também a possibilidade de realização de ensaios a seco ou lubrificados. No caso lubrificado, o disco é parcialmente submerso no óleo lubrificante como ilustrado na Figura 8. A rotação do disco submerso no lubrificante garante que haja lubrificação na interface de contato do disco com o pino.

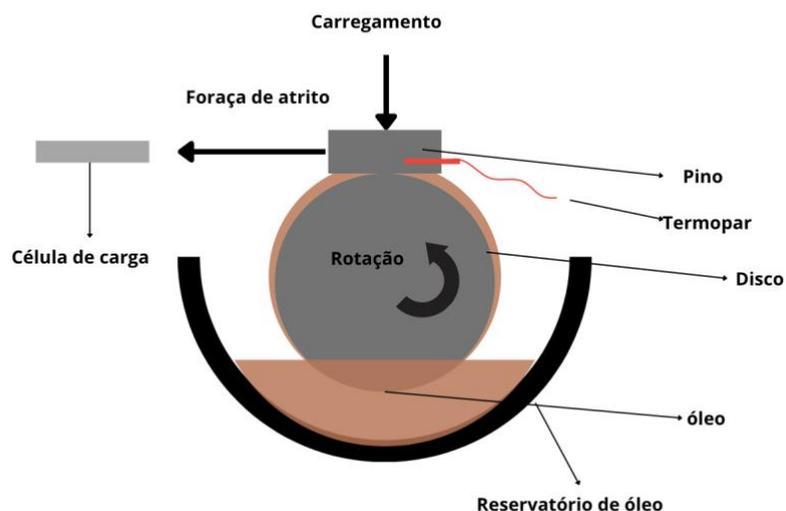


Figura 8 - Desenho esquemático ensaios lubrificados.  
Fonte: O autor.

O dispositivo é instrumentado com uma célula de carga de 5K (Figura 9) que mede os valores de força de atrito resultantes da interação pino-disco durante o ensaio de desgaste.



Figura 9 - Célula de carga  
Fonte: (WJ COMPONENTS, [s.d.])

As especificações da célula de carga são descritas na Tabela 1.

Tabela 1 - Especificações Célula de Carga.

Tipo	Single point
Faixa de operação	0 a 5 Kg
Erro	± 0,025 Kg

Fonte: (WJ COMPONENTS, [s.d.])

Outro parâmetro medido é a temperatura da região de desgaste que é feita por meio de um termopar do tipo “k” (Figura 10) inserido no pino para aquisição dos valores de temperatura ao longo do ensaio.



Figura 10 - Termopar.  
Fonte: (PLANET SENSOR, 2017)

As especificações da célula de carga são descritas na

Tabela 2 - Especificações termopar.

Tipo	“K”
Faixa de operação	0 a 1260° C
Erro	± 2,2°C ou ± 0,75%

Fonte: (PLANET SENSOR, 2017)

Os dados da célula de carga e do termopar são coletados por meio de um Arduino conectado ao computador. Há possibilidade de instalar no equipamento sensores de vibração e câmeras para aquisição de outros parâmetros a depender do interesse de pesquisa. O conjunto de instrumentos é ilustrado na Figura 11.



Figura 11 - Tribômetro Laboratório de Tribologia UnB Gama.  
Fonte: (MARINHO; GUSTAVO; GALÁRRAGA, [s.d.])

### **3.2.2 Método de quantificação das amostras contaminadas**

A amostragem dos biocombustíveis do presente trabalho deve ter suporte do laboratório de Materiais e Combustíveis do Instituto de Química da Universidade de Brasília, que cederá três amostras de cada biodiesel selecionado (B0, B10, B15 e B20). As amostras conterão 100 ml e serão transportadas em recipiente de vidro vedado. Todas as amostras são identificadas com data, hora, responsável, substância e volume (em consonância com a NBR 14883 de 2021).

A norma NBR 14883 de 2021 (Petróleo, derivados de petróleo e biocombustíveis - amostragem) é a norma que trata da amostragem manual de petróleo, derivados de petróleo e biocombustíveis, incluindo a preparação de amostras de combustíveis.

As amostras usadas no tribômetro serão compostas pela solução uniforme de 190,47 ml de óleo lubrificante mineral Turbo Diesel E700 SAE 15W40 cuja classificação API é CI-4 da fabricante Valvoline e 9,53 ml Biodiesel como 5% de contaminante.

- Volume total das amostras: 200 ml
- Volume óleo biodiesel para 5% de contaminação: 9,53 ml
- Volume óleo lubrificante: 190,47 ml

As amostras de biodiesel foram medidas em pipetas de vidro graduadas de 30 ml - com erro de 0,08 ml. As amostras de óleo lubrificantes foram medidas em provetas graduados de vidro de 250 ml. com erro de 2ml.

Em seguida ambas as amostras devem ser transferidas para Becker de vidro de 300 ml, misturadas em agitador de placa por 2 minutos para homogeneização da solução e utilizadas no tribômetro logo em sequência.

### **3.2.3 Calibração**

A calibração dos instrumentos instalados no tribômetro do Laboratório de Tribologia da Universidade de Brasília se deu em consonância com as diretrizes da norma ASTM G99 e ABNT NBR ISO IEC 17025 (Requisitos gerais para competência

de laboratórios de ensaio e calibração) garantindo competência, imparcialidade, rastreabilidade e repetibilidade dos ensaios realizados.

A calibração do termopar instalado é feita pelo método de comparação direta com termopar calibrado padrão cedido pelo laboratório de Física da Universidade de Brasília Campus Gama. A frequência de calibração é diária.

A velocidade do motor de indução do tribômetro é calibrada com auxílio de Tacômetro Óptico cedido pelo laboratório de Motores de Combustão Interna da Universidade de Brasília Campus Gama. A calibração é feita mensalmente utilizando a medição de RPM do tacômetro para ajuste da tensão do inversor que controla o motor de indução.

A célula de carga instalada no aparato experimental é calibrada utilizando cargas padrão de 1g, 10g, 100g e 1 Kg. A calibração é feita semanalmente.

### **3.2.4 Ensaios**

Os ensaios serão do tipo Pino-disco (Conforme Norma ASTM G99), com velocidade tangencial de 3,3 m/s, mesma velocidade empregada por (GUIMARÃES, 2022). A utilização dos mesmos parâmetros do trabalho citado tem por objetivo construir repetibilidade e abrangência das análises tribológicas feitas no laboratório.

O carregamento escolhido foi um dos utilizados por (GUIMARÃES, 2022), (MARINHO; GUSTAVO; GALÁRRAGA, [s.d.]) e (PACHECO, 2022). Os autores mencionados realizaram ensaios com o carregamento de 10 N aplicado perpendicularmente sobre o pino.

A duração dos testes será de 20 min, contemplando três ensaios de 10 min para construção da triplicata de ensaios.

Utilizar-se-á como material dos corpos de prova o Aço SAE 1045, seguindo o raciocínio disposto acima, (GUIMARÃES, 2022), (MARINHO; GUSTAVO; GALÁRRAGA, [s.d.]) e (PACHECO, 2022) realizaram ensaios com Aço SAE 1045.

Como lubrificante, será utilizado o óleo mineral Turbo Diesel E700, SAE 15W40 e API CI- 4 da Valvoline, possibilitando a comparação com os ensaios realizados no Relatório de consolidação dos testes e ensaios para validação da utilização de

Biodiesel B15 em motores e veículos (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - BRASIL, 2019).

Como contaminantes foram escolhidas soluções de 5% de biodiesel para 95% de óleo lubrificante. Selecionou-se quatro proporções de biodiesel no diesel, B0(100% Diesel) B10, B15, B20 descritas na Resolução CNPE N° 3 de 20/03/2023.

As características dos ensaios realizados no presente trabalho são listadas na Figura 12.

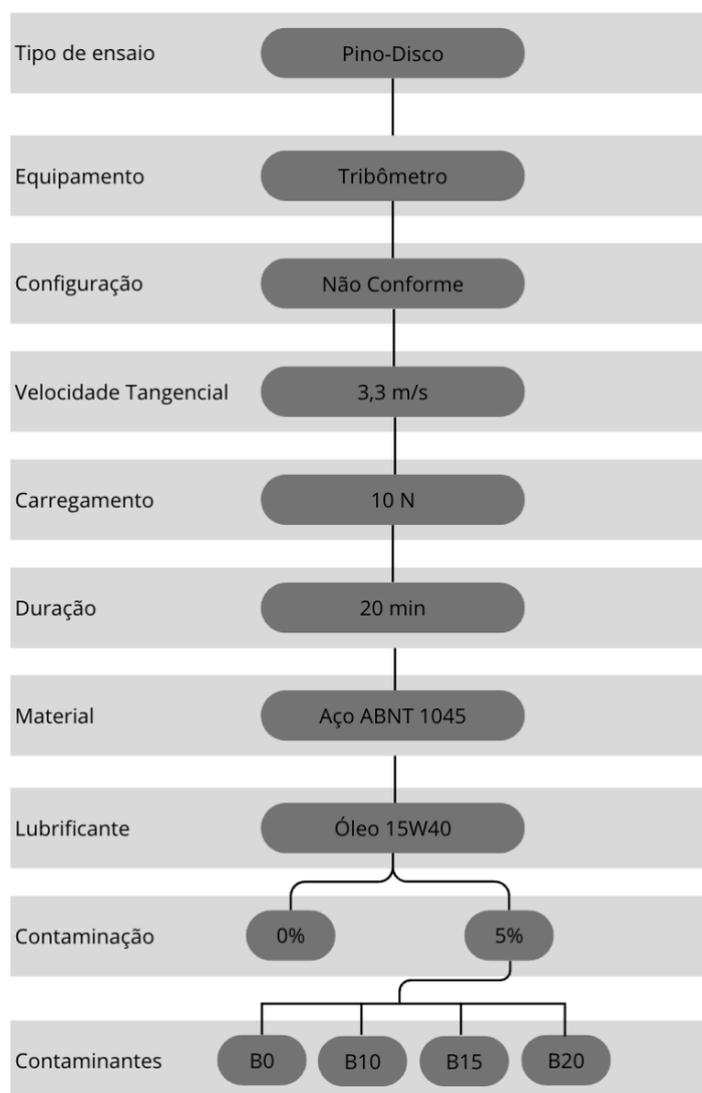
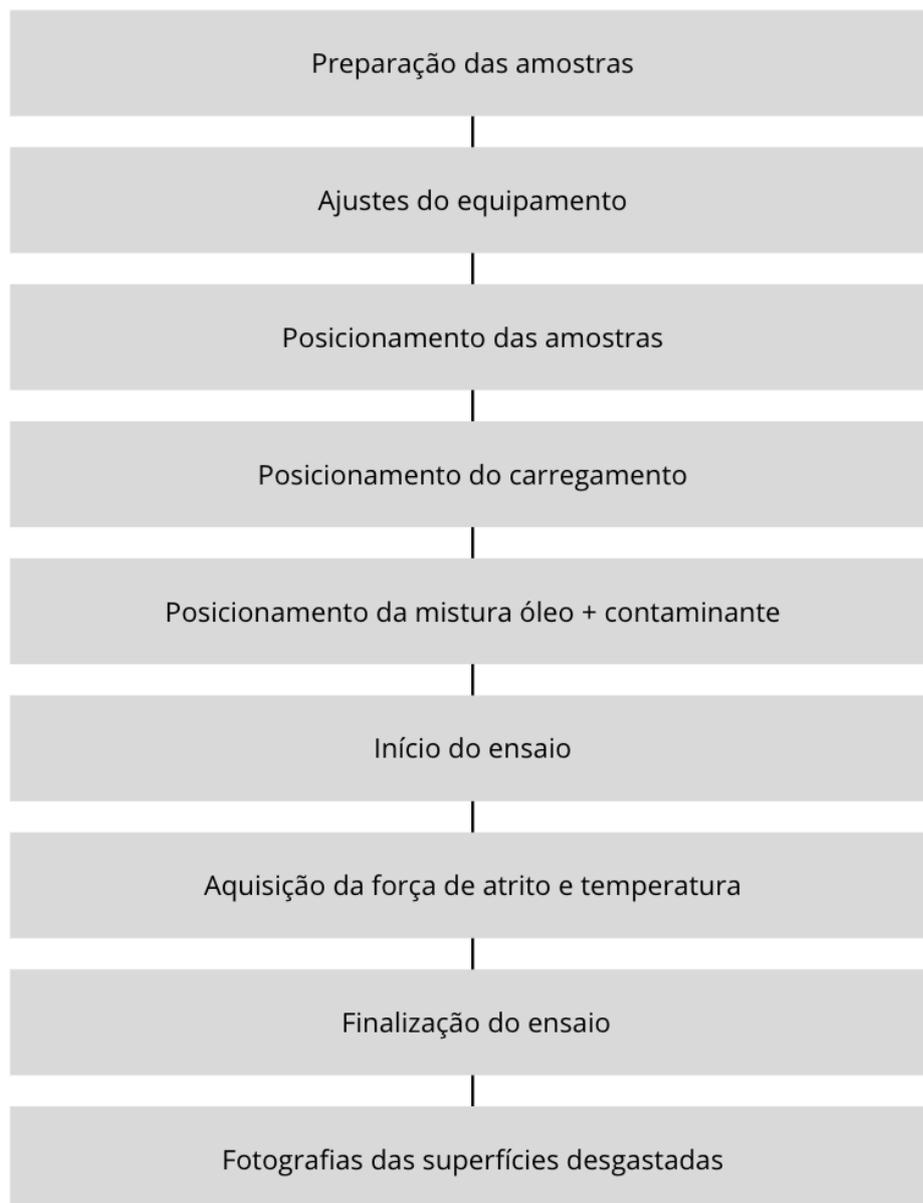


Figura 12 - Características dos ensaios.  
Fonte: O autor.

O procedimento experimental proposto seguirá as diretrizes da Norma ASTM G99, ilustradas na Figura 13. O preparo das amostras será: os discos foram lixados até a lixa de granulometria 3000 e então polidos com massa de polir automotiva, já os pinos foram lixados para remover marcas de usinagem e então lixados até a lixa de granulometria 400.

Em seguida, após a preparação das amostras, o tribômetro recebe os ajustes necessários, como apertos e regulagens de contrapesos e instrumentos. Em sequência as amostras foram posicionadas, o carregamento aplicado, o reservatório recebeu a solução de óleo + contaminante.

Dá-se o início do ensaio acionando o motor e ativando o cronômetro. Acompanha-se a aquisição dos parâmetros. Na sequência, após 10 min de ensaio, o motor é desligado e se interrompe a aquisição de dados. As amostras então são retiradas do equipamento e são fotografadas em lupa estetoscópica.



*Figura 13 - Procedimento experimental.  
Fonte: O autor.*

### 3.2.5 Método estatístico para tratamento dos resultados

O método estatístico selecionado para o presente trabalho é o Método Estatístico de Triplicata, selecionado para mitigar possíveis erros experimentais e garantir confiabilidade e repetibilidade dos ensaios. Cada ensaio é repetido três vezes nas mesmas condições experimentais, observando condições climáticas e de operação.

Em seguida, para cada variável de interesse (força de atrito e temperatura) é calculada a média simples dos valores obtidos em cada ensaio da triplicata e na sequência o desvio padrão.

$$\bar{X} = \frac{X_1 + X_2 + X_3}{3} \quad (1)$$

Onde:

- $\bar{X}$  (Média aritmética)
- $X_1$  (Valor do primeiro ensaio)
- $X_2$  (Valor do segundo ensaio)
- $X_3$  (Valor do terceiro ensaio)

Fonte:(DOUGLAS C. MONTGOMERY, 2008)

$$s = \sqrt{\frac{(X_1 - \bar{X})^2 + (X_2 - \bar{X})^2 + (X_3 - \bar{X})^2}{n - 1}} \quad (2)$$

Onde:

- $n=3$  (número de réplicas)
- $(n-1)$  é a correção de Bessel (utilizado para corrigir o viés em pequenas amostras)

Fonte:(DOUGLAS C. MONTGOMERY, 2008)

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para execução dos ensaios Pino-disco, faz-se necessária a observância do procedimento operacional padrão:

O procedimento para os ensaios do tipo Pino-Disco inicia com a preparação dos equipamentos, que compreende: Inspeção em todo o equipamento, verificação dos apertos nos conjuntos móveis, nos parafusos, porcas e arruelas. Certificando de que todas as ferramentas auxiliares, como balanças, cronômetros e sistemas de aquisição de dados, estejam calibrados e prontos para uso.

A preparação das amostras compreende: preparação dimensional, superficial e limpeza. Cada amostra deve ser identificada de forma clara para evitar trocas e devem ser armazenadas em condições adequadas antes e após o ensaio.

Na medição da variação de massa das amostras do pino, utilize uma balança calibrada para medir a massa inicial do pino. Sugere-se o uso da mesma balança na triplicata de ensaios.

Posicione as amostras corretamente no porta amostras e no eixo de rotação. Certifique-se de que todas as peças estão firmemente fixadas para evitar deslocamento ou vibração durante o teste. Verifique o alinhamento do pino em relação ao disco para que não haja divergências nas marcas de desgaste.

O carregamento deve ser ajustado cuidadosamente para evitar sobrecarga, que pode comprometer o equipamento ou alterar os resultados obtidos. Recomenda-se que o carregamento não ultrapasse 2kg.

Misture e prepare as soluções de lubrificante e biodiesel nas concentrações estabelecidas. Certifique-se de que as soluções estejam homogêneas e sem impurezas, seguindo as instruções específicas para o teste.

Insira a solução preparada no equipamento, garantindo que o líquido seja distribuído de forma uniforme nos pontos de contato. Verifique se não há vazamentos ou obstruções que possam interferir no experimento.

Ligue o motor e observe o funcionamento durante os primeiros segundos para identificar ruídos ou sinais de mau funcionamento.

Inicie o cronômetro e a aquisição de dados simultaneamente ao acionamento do motor para medir corretamente os parâmetros do ensaio. O controle preciso do tempo é essencial para garantir a repetibilidade do experimento.

Durante a aquisição de dados monitore se a frequência de aquisição se mantém a mesma, caso haja erros ou atrasos, o ensaio deverá ser interrompido e os resultados descartados.

O desligamento do motor deve ser feito de forma simultânea a parada do cronômetro e o fim da aquisição de dados.

A retirada das amostras (óleo lubrificante, pino e disco) deve ser feita de forma a não gerar riscos e marcas e as amostras devem ser limpas e armazenadas em local apropriado, para que logo em seguida seja feita a medição de massa e análises superficiais.

Após o término do ensaio, limpe cuidadosamente todos os componentes do equipamento e utensílios utilizados, evitando resíduos de lubrificante, biodiesel ou outros contaminantes. A limpeza adequada prolonga a vida útil dos equipamentos e garante resultados consistentes em testes futuros.

#### Etapas:

1. Preparação dos equipamentos
2. Preparação das amostras
3. Medição massa amostra Pino
4. Ajuste das amostras no equipamento
5. Ajuste do carregamento no equipamento
6. Preparação das amostras de lubrificante e biodiesel
7. Ajuste da solução no equipamento
8. Acionamento do motor
9. Acionamento cronômetro
10. Aquisição de dados
11. Desligamento do motor
12. Parada do cronômetro
13. Parada na aquisição de dados

14. Retirada das amostras
15. Medição da massa do Pino
16. Limpeza dos equipamentos

Observações importantes:

Por conta da vibração gerada nos ensaios, os parafusos, encaixes e porcas devem ser apertados antes e após cada ensaio, para que não haja folgas e uma resposta de rigidez diferente do projetado.

Por conter o sistema de rotação exposto (polia, eixo do motor e mancais) o equipamento necessita de cautela e uso adequado de EPIs.

Observar possíveis empenamentos e torções no braço do porta amostras, caso ocorram, o componente deverá ser substituído.

Calibração:

- Célula de carga - Método: Comparação com cargas conhecidas. Frequência: semanal.
- Termopar - Método: Comparação com Termopar Padrão. Frequência: Diária.
- Motor/ Inversor de frequência - Medição com tacômetro ótico. Frequência: mensal.

Orientações de segurança:

- Esperar que o motor interrompa a rotação para retirar as amostras.
- Verificar se há folgas nas polias.
- Verificar a integridade das polias.
- Verificar o posicionamento e ajuste das amostras
- Verificar o posicionamento e ajuste das cargas.

EPIs obrigatórios:

- Óculos.
- Jaleco sem manga.
- Protetor auricular.

A análise comparativa do óleo lubrificante antes e depois do ensaio pode ser executada com os equipamentos:

- FTIR (Espectometria de infravermelho por transformada de fourier) – Laboratório de análise instrumental (FGA)
- RMN (Ressonância Magnética Nuclear) – Central analítica do Instituto de química da UnB
- Analisador elementar (CHNS) – Central analítica do instituto de química
- Dinamômetro de chassi (DYNOMite de 12” com freio) – Laboratório de desempenho automotivo (FGA)
- Dinamômetro ativo de bancada (DYNOMite AC drive) – Laboratório de ensaio de motores (FGA)

Possibilitando a análise de composição dos compostos orgânicos e inorgânicos, permitindo quantificar a oxidação, Índice de Acidez Total e Índice de Basicidade Total e a quantidade e composição dos *debris* gerados no ensaio de desgaste.

Dada a impossibilidade de realização dos ensaios, o capítulo de Resultados e Discussão trará resultados do equipamento descrito no capítulo anterior e resultados obtidos com metodologias similares a do presente trabalho.

Guimarães, 2022, apresenta uma análise do atrito e desgaste sob diferentes condições de carregamento e lubrificação para conjunto pino/disco de aço SAE 1045. A autora apresenta resultados obtidos com uma metodologia baseada na norma ASTM G99 e trabalhos clássicos de tribologia. Os ensaios realizados no laboratório de tribologia da Universidade de Brasília – FGA são de uma excelente referência para o presente trabalho.

Na Figura 14 a autora apresenta os resultados do ensaio a seco com carregamento equivalente a 10N. Nota-se com o apoio do gráfico supracitado, o crescimento da força de atrito de forma rápida, dentro de 2 segundos de ensaio. Logo após segue-se um período de valores que apresentam uma oscilação maior, até cerca de 200 segundos de ensaio. Essa janela de maior oscilação é chamada de região de

*running*, ou seja, região na qual acontece o acomodamento das superfícies. Após esse período, pode-se observar a estabilização em valores próximos a 4N até o fim do ensaio.

Quanto aos valores de temperatura, a autora apresenta os resultados do ensaio com carregamento de 10N na mesma figura citada acima. Nota-se um aumento rápido dos valores de temperatura na interface de contato logo nos primeiros 100 segundos e logo segue-se um aumento gradativo que apresenta sutil estabilidade em torno de 95 °C.

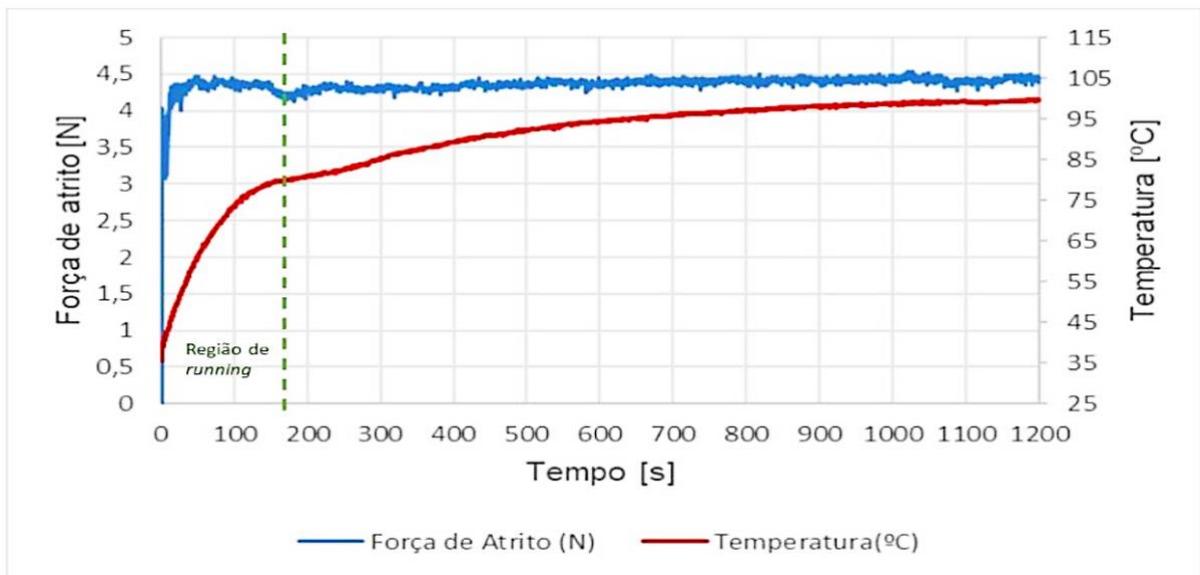


Figura 14- Variação da força de atrito e da temperatura em função do tempo de ensaio. Ensaio a seco com carga de 10N. Fonte:(GUIMARÃES, 2022).

A autora apresenta em seguida (Figura 15) os valores do coeficiente de atrito, obtidos a partir dos valores de força de atrito. Nota-se a estabilização do coeficiente de atrito em torno de 0,45.

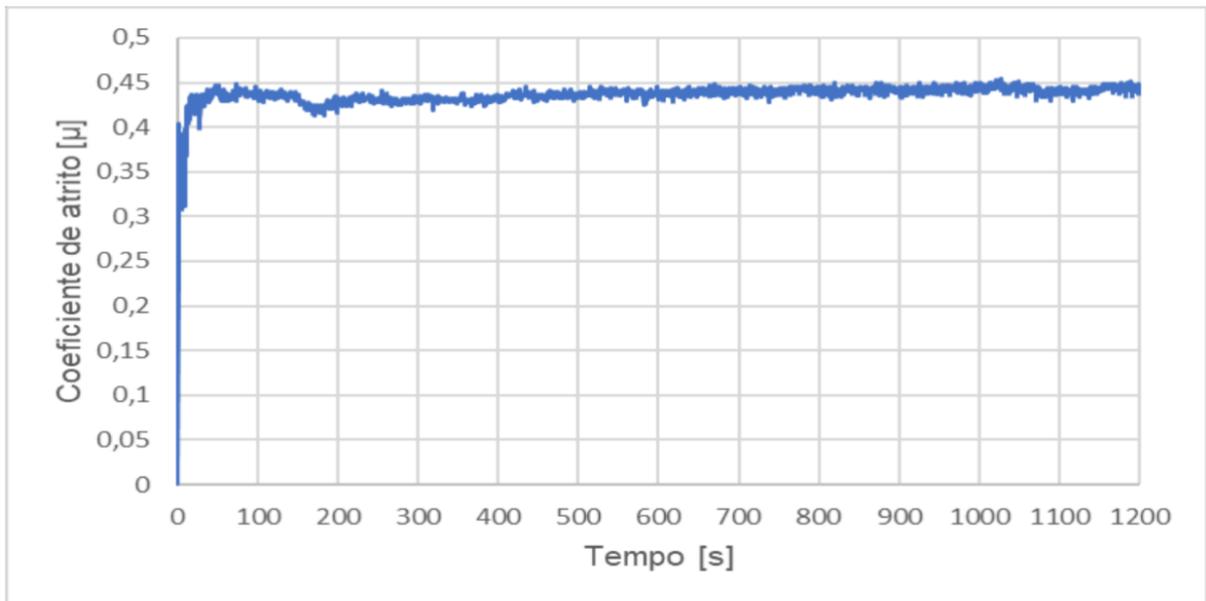


Figura 15- Variação do coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio. Ensaio a seco com a carga de 10N. Fonte: (GUIMARÃES, 2022).

Após a realização dos ensaios, Guimarães apresenta a análise superficial das marcas de desgaste nas amostras do pino e do disco. Na Figura 16 pode-se notar a esquerda a cratera formada na superfície do disco em decorrência dos mecanismos de desgaste por deslizamento, com ênfase nos mecanismos relacionados à fadiga e tensões cíclicas. À direita, observa-se as marcas deixadas no pino após o ensaio. Nota-se crateras e marcas relacionadas a mecanismos adesivos e a consequente deformação plástica observadas pela presença de rebarbas.

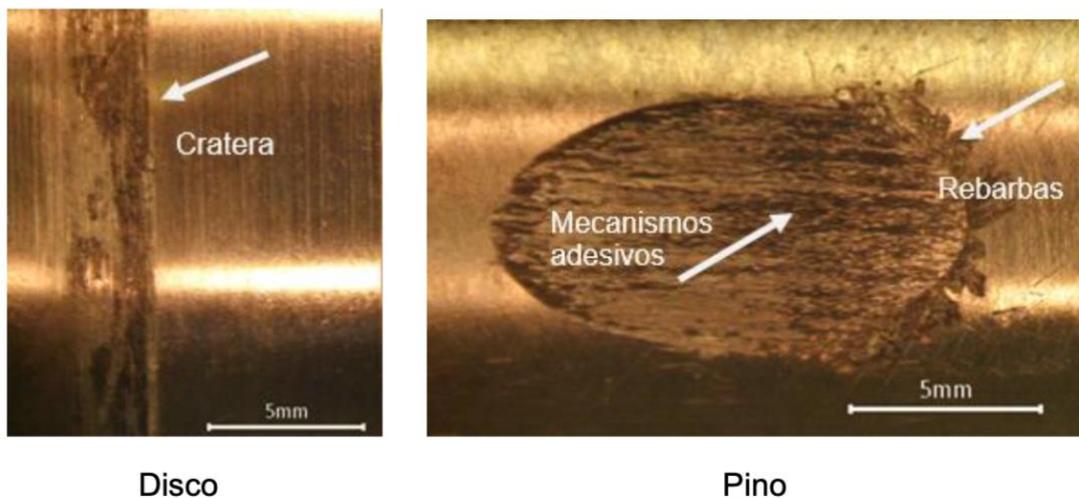


Figura 16- Superfícies desgastadas do disco e pino após ensaio a seco com 10N. Fonte: (GUIMARÃES, 2022).

A perda de massa durante o ensaio a seco com carregamento de 10N é apresentada na Tabela 3. A massa perdida foi de 145 mg com margem de erro de 10 mg.

*Tabela 3- Perda de massa do ensaio a seco com a carga de 10N*

Carga do ensaio [N]	Massa Perdida [ $10^{-3}$ g]
10	$145 \pm 10$

Fonte:(GUIMARÃES, 2022)

Na sequência, a autora apresenta os resultados do ensaio feito com a presença do lubrificante. Na Figura 17 são trazidos os valores de força de atrito e temperatura do ensaio com carregamento de 10 N e lubrificação por Óleo SAE 5W40. É possível observar no gráfico que a força de atrito aumenta expressivamente nos primeiros segundos de ensaio, há um pico que atinge valores em torno de 2,7 N, mas logo em seguida atinge valores em torno de 1,6 N. O intervalo de 0 a 100 segundos compreende o período de “*running*” que apresenta maiores oscilações em decorrência da acomodação das superfícies. Após o “*running*” os valores de força de atrito estabilizam em torno de 1,3 N.

Os valores de temperatura apresentam crescimento inicial expressivo, com um aumento maior nos primeiros segundos de ensaio. Indicando tanto o início do ensaio como o período de “*running*” onde a força de atrito atinge valores mais elevados. Após

esse intervalo, a temperatura cresce de forma linear atingindo um valor máximo de 38,5 °C.

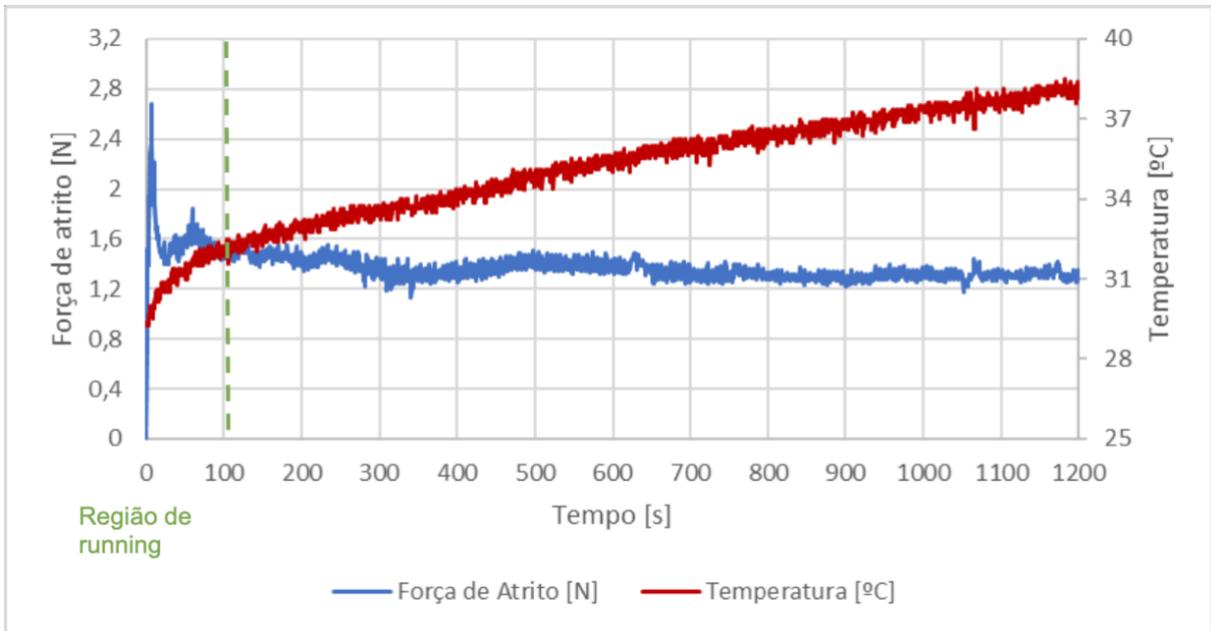


Figura 17- Variação da força de atrito e da temperatura em função do tempo de ensaio. Ensaio lubrificado com óleo 5w40 com carga de 10N. Fonte: (GUIMARÃES, 2022)

Os valores de coeficiente de atrito da condição lubrificada com óleo SAE 5W40 obtidos por Guimarães são apresentados na Figura 18. Os valores de coeficiente de atrito alcançam a estabilidade em torno de 0,13. O coeficiente de atrito tem variações pontuais, mas apresenta comportamento que tende a estabilidade.

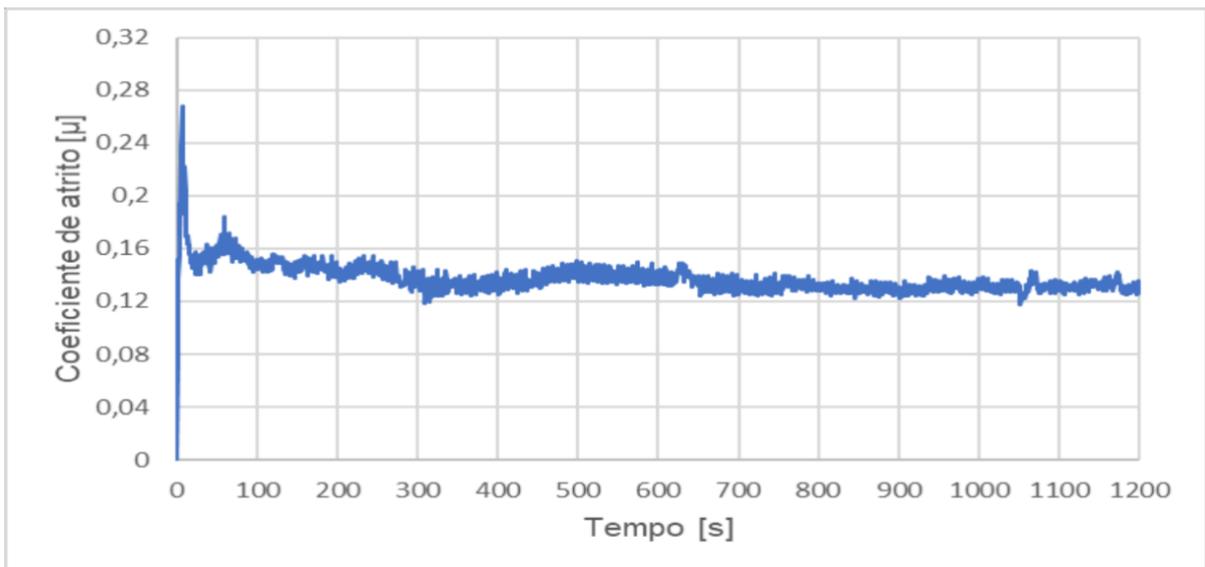


Figura 18- Variação do coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio lubrificado com óleo 5w40 e carga de 10N. Fonte:(GUIMARÃES, 2022)

A análise das superfícies da condição de ensaio mencionada acima é trazida na Figura 19. A esquerda observa-se a superfície do disco após o ensaio e a direita a superfície do pino também após o ensaio. Nota-se na superfície do disco sulcos no sentido do deslizamento que indicam ocorrência de mecanismos abrasivos causados por protuberâncias mais duras e partículas retiradas do próprio material geradas pela deformação plástica das superfícies em contato.

A superfície do pino apresenta marcas de deformação plástica, caracterizadas pelas rebarbas na marca em formato de elipse. Nota-se também sulcos no sentido de deslizamento do disco que indicam presença de mecanismos de desgaste por deslizamento.

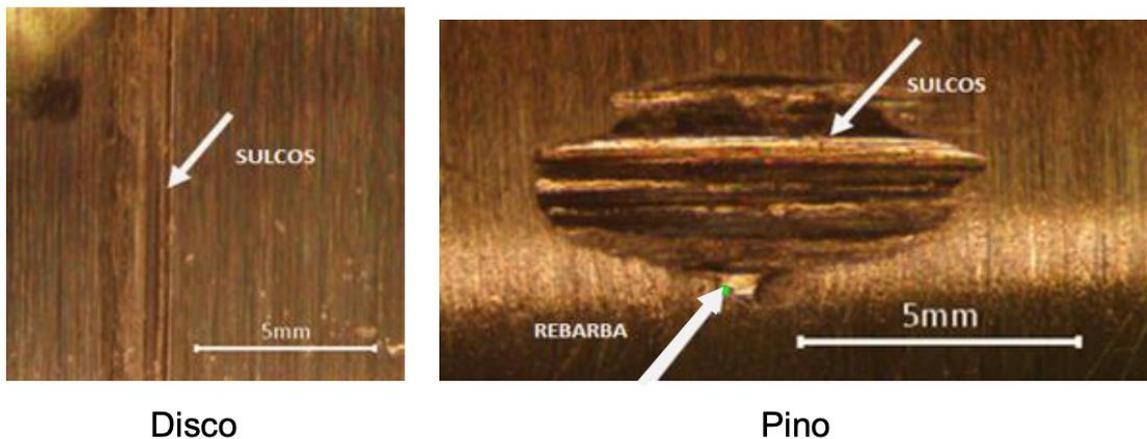


Figura 19 - Superfícies desgastadas do disco e pino após ensaio lubrificado com óleo 5w40 e carga de 10N. Fonte:(GUIMARÃES, 2022)

A perda de massa durante o ensaio lubrificado a óleo é apresentada na Tabela 4 disposta abaixo. A perda de massa foi de 10 mg com margem de erro de 0,2 mg.

Tabela 4 - Perda de massa no ensaio lubrificado com óleo 5w40 com a carga de 10N.

Carga do ensaio [N]	Massa Perdida [ $10^{-3}$ g]
10	$10 \pm 0,2$

Fonte:(GUIMARÃES, 2022)

A última condição ensaiada pela autora foi a condição lubrificada com óleo SAE 5W40 e o aditivo Militec-1, nas proporções indicadas pelo fabricante. Os resultados

da força de atrito e temperatura são trazidos na Figura 20. Analisando a força de atrito, a região de acomodação, região de “running” teve a duração de aproximadamente 100 segundos e após esse período os valores da força de atrito oscilam notadamente no intervalo de 300 a 400 segundos de ensaio. Seguidos de valores mais uniformes e com menos oscilação. A força de atrito ao fim do ensaio tem média em torno de 0,5 N.

Os valores de temperatura na condição mencionada acima são apresentados na Figura 21. Pode-se observar o abrupto aumento da temperatura após 20 segundos de ensaio, em decorrência do aumento da força de atrito durante a acomodação das superfícies. No decorrer do ensaio a temperatura aumenta de forma linear, atingindo valores em torno de 30 °C.

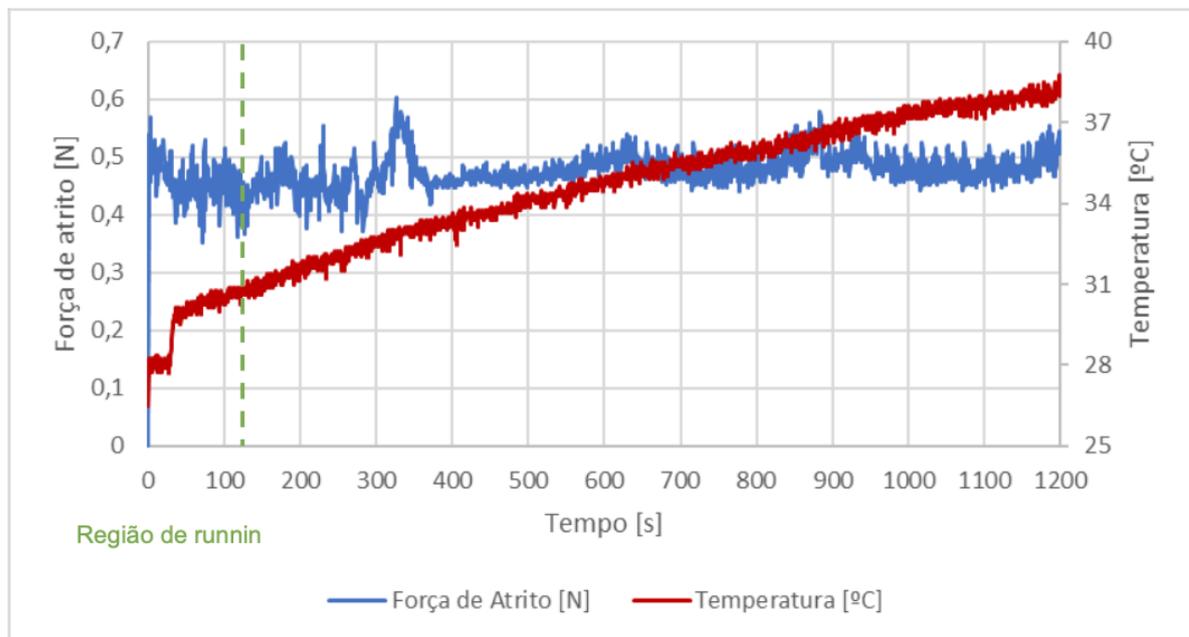


Figura 20- Variação da força de atrito e da temperatura em função do tempo de ensaio. Ensaio lubrificado com Militec com carga de 10N. Fonte: (GUIMARÃES, 2022).

O coeficiente de atrito da condição de ensaio de carregamento equivalente a 10 N e lubrificado com a solução óleo SAE 5W40 e Militec-1 são apresentados na Figura 21. A análise do coeficiente de atrito indica o comportamento de maior oscilação nos mecanismos de desgaste na interface pino disco. Nota-se que até 400 segundos de ensaio o coeficiente de atrito oscilou de forma notória e somente após a metade do ensaio pode-se observar uma tendência de estabilização.

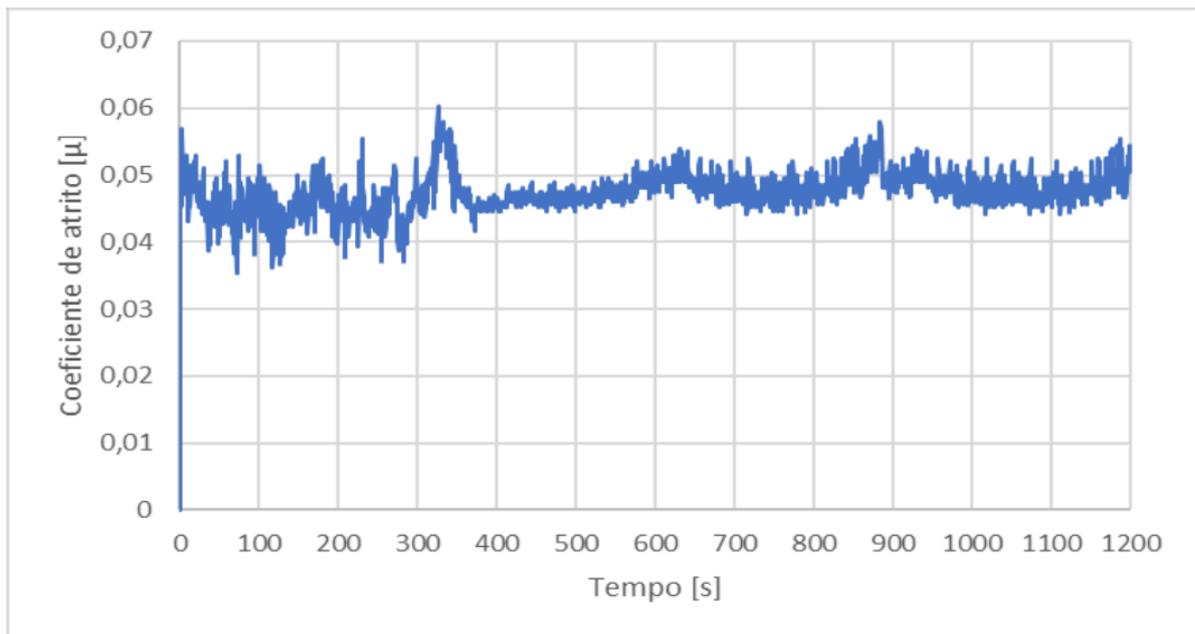


Figura 21 - Variação do coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio. Ensaio lubrificado com Militec a carga de 10N. Fonte:(GUIMARÃES, 2022) .

A autora em sequência apresenta as fotografias da superfície do pino e disco após o ensaio -- Figura 22. No disco é possível notar sulcos e marcas advindas de mecanismos abrasivos, que ocorreram ainda que houvesse lubrificação na interface de contato. Na superfície do pino, observa-se mais marcas características de processos abrasivos, tais como sulcos acentuados no centro da marca em formato elipsoide e rebarbas não uniformes em ambas as bordas.

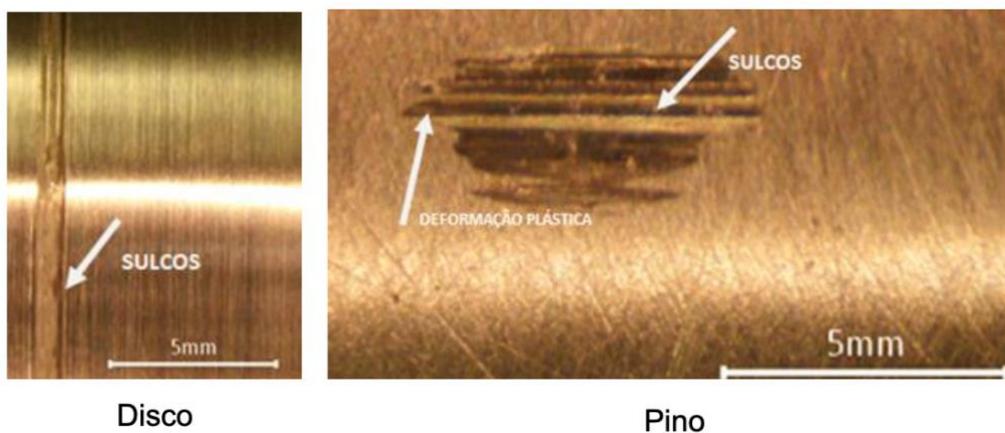


Figura 22- Superfície desgastada disco e pino após ensaio lubrificado com Militec com 10N. Fonte: GUIMARÃES, 2022.

A perda de massa em tal condição foi de 4 mg com erro de 3 mg. Apresentada na Tabela 5.

*Tabela 5 - Perda de massa no ensaio lubrificado com óleo 5w40 e Militec-1 com a carga de 10N*

Carga do ensaio [N]	Massa Perdida [ $10^{-3}$ g]
10	$4 \pm 3$

Fonte:(GUIMARÃES, 2022)

A comparação direta entre as três condições de ensaio pode-se ser feita utilizando as fotografias superficiais dos discos após os ensaios e os valores de perda de massa das três condições. A Tabela 6 apresenta na sequência da esquerda para a direita as superfícies após a condição de ensaio a seco, com lubrificação a óleo SAE 5W40 e com lubrificação SAE 5W40 e Militec-1.

A condição que gerou mais danos na superfície após o ensaio foi a condição sem lubrificação. A ausência de elemento lubrificante é intenso fator prejudicial e gera maior coeficiente de atrito, maior temperatura e maiores e mais severos danos superficiais. Dentre as condições lubrificadas, a condição com a presença do aditivo Militec-1 foi a que apresentou as menos severas marcas de desgaste, indicando o bom desempenho do aditivo.

*Tabela 6- Comparação entre os ensaios com carregamento de 10 N. Superfícies dos discos.*

Tipo de ensaio	Seco	Óleo 5w40	Óleo 5w40 + Militec
10N			

Fonte:(GUIMARÃES, 2022) com adaptações.

A *Tabela 7* possibilita a comparação direta das condições ensaiadas num quesito que demonstra a severidade do desgaste sofrido, a perda de massa indica quão intensos foram os mecanismos de desgaste e os possíveis danos superfícies ocorridos. Na tabela nota-se a discrepância dentre a perda de massa no ensaio a seco e nos ensaios lubrificados. A perda de massa no ensaio a seco é 14 vezes maior do que o ensaio lubrificado com óleo SAE 5W40 e 30 vezes maior do que a condição com a presença do aditivo Militec-1. Dentre as condições lubrificadas, a presença do aditivo garantiu a diminuição da perda de massa, indicando o bom desempenho do aditivo Militec-1.

*Tabela 7 - Comparativo perda de massa.*

Condição do ensaio	Massa Perdida [ $10^{-3}$ g]
A seco	$147 \pm 13$
Lubrificado a óleo SAE 5W40	$10 \pm 2$
Lubrificado a óleo SAE 5W40 e Militec- 1	$4 \pm 3$

Fonte:(GUIMARÃES, 2022) com adaptações.

Cuerva et. Al.(2021) utiliza método similar ao do presente trabalho, o autor efetuou ensaios em um tribômetro do tipo pino-disco com amostras de aço ABNT 8640 e aço ABNT 4140, onde foram utilizados quatro tipos de contaminantes adicionados ao óleo lubrificante de classificação API CF SAE 40 para avaliar o desempenho de diferentes composições de biodiesel e com diferentes concentrações, 2% e 5%. Os ensaios foram feitos com velocidade tangencial de 1 m/s com carregamento de 5 kg, com duração de 66 minutos. Contaminantes: Biodiesel comercial, biodiesel de origem animal, biodiesel de origem vegetal e Biodiesel de origem vegetal e animal.

Resultados obtidos:

- Ferrograma do óleo lubrificante contaminado após o ensaio.
- Viscosidade do óleo lubrificante após o ensaio (Método de Saybolt).
- Análise de TBN do óleo lubrificante após o ensaio.

Cuerva apresenta resultados muito interessantes quanto ao desempenho do lubrificante que sofreu contaminação com biodiesel. Com relação a viscosidade, foi encontrado que, quanto maior a contaminação, menor é a viscosidade do lubrificante, coincidindo com o exposto pela literatura em relação ao tema, visto que o biodiesel é menos viscoso que o lubrificante.

Os ferrogramas indicaram que a contaminação do biodiesel teve efeito benéfico no desgaste das peças de aço ABNT 8640 e aço ABNT 4140. A contaminação de 5% foi ainda mais benéfica em relação a contaminação com concentração de 2%. Cuerva mostra que as quantidades de cloro, zinco, cálcio, potássio e enxofre diminuíram com a adição de contaminantes e na mesma proporção do teor de contaminantes adicionados. Estes elementos químicos fazem parte da composição dos aditivos do lubrificante utilizado e a diminuição na concentração de tais elementos indica uma deterioração dos aditivos, que deve se acentuar numa contaminação prolongada de biodiesel.

Com 5% de contaminação do biodiesel animal houve um aumento no índice de viscosidade. Por outro lado, a contaminação de 5% de biodiesel animal + vegetal diminuiu o índice de viscosidade em relação ao diesel B5. Também constatamos que essas adições de biodiesel não foram prejudiciais ao motor e ao lubrificante nas proporções de mistura e condições de teste utilizadas. Cuerva valida a utilização da metodologia de ensaios pino-disco para a avaliação da performance de lubrificantes contaminados com biodiesel.

A comparação da contaminação do óleo lubrificante em motores com diferentes misturas de biodiesel, encomendado pelo Ministério de Minas e Energia (MME, 2019), incluem os seguintes resultados:

Em testes realizados pela Renault com o veículo Renault Master Chassi Cabine, equipado com o motor M9T 882 (2.3 dCi, 16V) e utilizando uma mistura B15 (15% biodiesel e 85% diesel), não foram observadas anomalias após 10.000 km de rodagem. Amostras de 250 ml de óleo lubrificante foram coletadas após cada ciclo de 10.000 km, e os resultados indicaram que o óleo permaneceu dentro dos parâmetros esperados, mesmo com a adição de biodiesel.

Por outro lado, a Volkswagen conduziu testes comparativos em sua Amarok com os motores R4 EA 189 TDI e BTDI, também utilizando a mistura B15, ao longo

de 100.000 km. Nesses motores, foi detectada uma significativa contaminação do óleo lubrificante, com aproximadamente 50% do material contaminante composto por biodiesel. Essa contaminação, mais pronunciada do que a observada pela Renault, pode comprometer a eficiência do óleo, embora a manutenção dos intervalos de troca em 10.000 km possa mitigar esse impacto.

A Scania, em sua avaliação, constatou que o uso da mistura B15 resultou em uma redução de 1/3 na vida útil do óleo lubrificante, em comparação ao uso de diesel comercial puro. Esse dado sugere que a presença de biodiesel na mistura pode acelerar a degradação do lubrificante, exigindo uma maior frequência nas trocas de óleo.

A Cummins, em seus ensaios, avaliou a mistura B20 (20% biodiesel e 80% diesel), comparando-a com o B10 (10% biodiesel e 90% diesel). Em um experimento que envolveu o aquecimento de recipientes contendo óleo lubrificante misturado com esses combustíveis, verificou-se que o B20 possui uma menor volatilidade, evaporando mais lentamente que o B10. Esse comportamento sugere que o B20 pode aumentar o risco de contaminação do óleo lubrificante, potencialmente reduzindo os intervalos de troca de óleo e filtros, o que poderia elevar os custos operacionais das frotas.

A CNHi conduziu testes extensivos em quatro motores utilizando a mistura S500 B20, composta por 70% de biodiesel de soja e 30% de gordura animal. Os motores testados incluíram o F1C (3 L – S10), N67 (6.7 L – S500), Cursor 9 (8.7 L – S500) e cursor 10 (10 L – S500). Foram também realizados testes com veículos e equipamentos fora de estrada. A empresa está considerando alterar os intervalos de troca de óleo em alguns de seus produtos equipados com EGR, devido à queda do TBN e à diluição por combustível, especialmente em ciclos urbanos que requerem a regeneração do filtro DPF.

Além disso, foram realizados testes em dinamômetro para avaliar o desempenho desses motores sob diferentes condições operacionais:

- Motor F1C:
  - Potência: 125 kW @ 3500 rpm
  - Torque: 450 Nm @ 1400 rpm
  - Deslocamento volumétrico: 2998 cm<sup>3</sup>

- Diâmetro: 95,8 mm
- Curso: 104 mm
- Sistema de injeção: Eletrônica Common Rail Bosch
- Tratamento de emissões: EGR + DOC/DPF
- Limite de emissões: PROCONVE P7 (Euro V)
- Total de horas de teste: 200h (FPI.TME015) + 200h (FPI.TME0E39)
- Motor N67:
  - Potência: 113 kW @ 2500 rpm
  - Torque: 550 Nm @ 1600 rpm
  - Deslocamento volumétrico: 6728 cm<sup>3</sup>
  - Diâmetro: 104 mm
  - Curso: 132 mm
  - Sistema de injeção: Mecânica Bomba Rotativa Delphi
  - Tratamento de emissões: EGR interno
  - Limite de emissões: PROCONVE MAR-I (Tier 3)
  - Total de horas de teste: 200h (FPI.TME015) + 200h (FPI.TME0E39)
- Motor Cursor 9:
  - Potência: 178 kW @ 2100 rpm
  - Torque: 1750 Nm @ 1500 rpm
  - Deslocamento volumétrico: 8710 cm<sup>3</sup>
  - Diâmetro: 117 mm
  - Curso: 135 mm
  - Sistema de injeção: Eletrônica Common Rail Bosch
  - Tratamento de emissões: EGR interno
  - Limite de emissões: PROCONVE MAR-I (Tier 3)
  - Total de horas de teste: 200h (FPI.TME015) + 200h (FPI.TME0E39)
- Motor Cursor 10:
  - Potência: 309 kW @ 2100 rpm
  - Torque: 1900 Nm @ 1050 rpm
  - Deslocamento volumétrico: 10300 cm<sup>3</sup>
  - Diâmetro: 125 mm
  - Curso: 140 mm

- Sistema de injeção: Eletrônica Unidade Injetora Bosch
- Tratamento de emissões: SCR Ti-V
- Limite de emissões: PROCONVE P7 (Euro V)
- Total de horas de teste: 200h (FPI.TME015) + 200h (FPI.TME0E39)

Esses testes demonstram a complexidade das interações entre diferentes proporções de biodiesel e a durabilidade do óleo lubrificante, influenciando diretamente a eficiência e os custos operacionais dos motores.

Nos motores equipados com tecnologia SCR (Redução Catalítica Seletiva), os lubrificantes mantiveram o TBN (Total Base Number) e a viscosidade acima dos valores mínimos, garantindo maior durabilidade do óleo e permitindo os intervalos de troca previstos. Em contrapartida, nos motores com tecnologia EGR (Recirculação de Gases de Escape), o TBN e a viscosidade variam conforme o ciclo de operação; em rodagem em estrada, os intervalos de troca se mantêm dentro dos parâmetros, mas no ciclo urbano, especialmente com o uso de B20, o intervalo deve ser reduzido pela metade, devido ao desgaste mais agressivo observado, o que pode exigir uma revisão dos intervalos de troca.

No laboratório, foram coletadas amostras de Diesel Comercial (B10) e Diesel Experimental (B20), além de uma amostra de óleo lubrificante 15W40 CI4 da Valvoline. O diesel foi adicionado ao óleo lubrificante em um Becker, até atingir uma concentração de 5% em volume de diesel no óleo. Essa preparação foi realizada em duplicata para cada tipo de diesel, resultando em duas amostras denominadas Amostra 1 e Amostra 2.

As amostras foram aquecidas em uma base de aquecimento, seguindo uma curva de temperatura em função do tempo, conforme ilustrado no gráfico abaixo. Quando a temperatura desejada era alcançada, ela era mantida por 10 minutos para garantir uniformidade. Em seguida, a amostra era rapidamente transferida para o equipamento onde a concentração da diluição era medida novamente, com o objetivo de determinar a taxa de evaporação do combustível presente no óleo ( Figura 23).

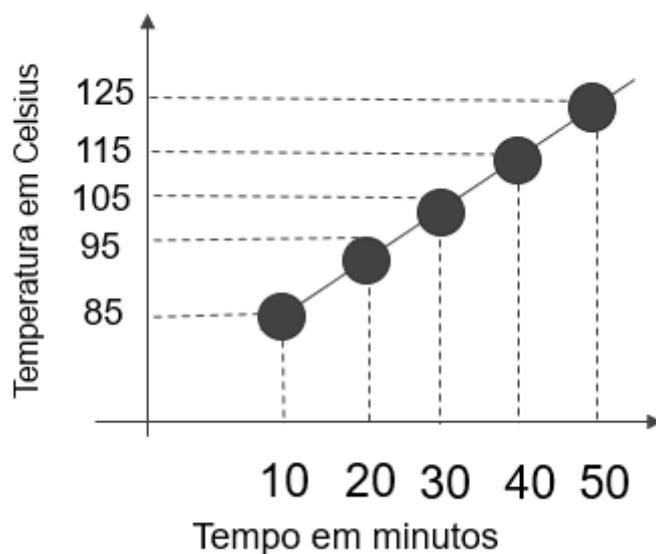


Figura 23 - Curva de aquecimento. Fonte: (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - BRASIL, 2019) .

A Figura 23 mostra claramente que a concentração inicial de ambas as amostras (B10 e B20) era de 5%. No entanto, à medida que o aquecimento prosseguia, observou-se que o B10 apresentou uma taxa de evaporação maior do que o B20. Isso indica que o B20 permaneceu diluído por um período mais longo nas amostras de óleo.

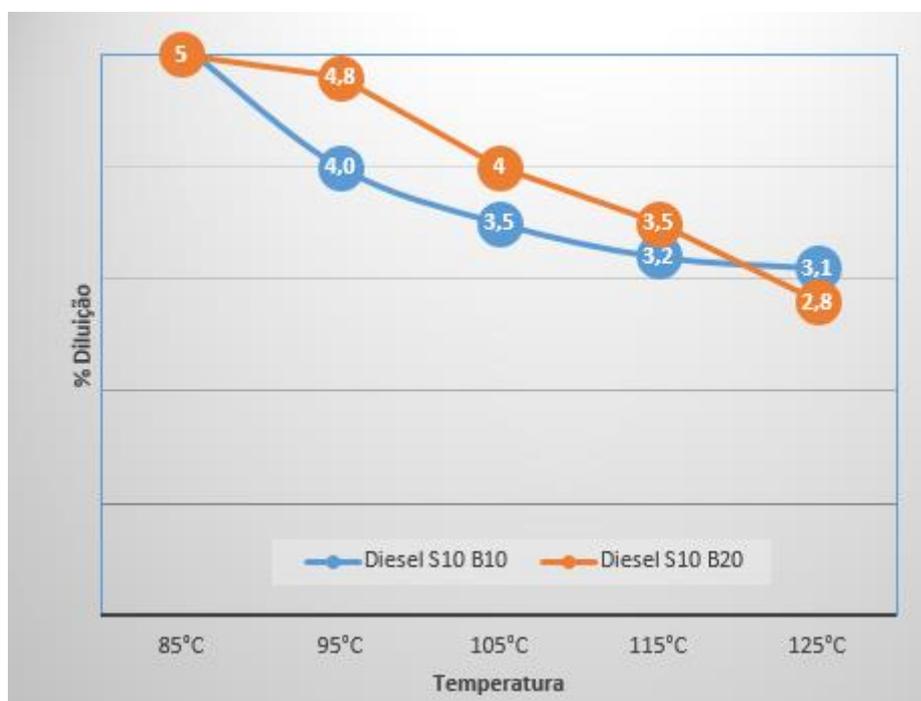


Figura 24 - Monitoramento da concentração de diesel no óleo aquecido. Fonte: (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - BRASIL, 2019).

A análise da Anfavea sobre a influência da contaminação do lubrificante por biodiesel destaca que essa contaminação pode levar a um aumento na periodicidade de troca de óleo e filtros, um aumento no consumo de combustível e um desgaste acelerado dos componentes metálicos do motor. Esses fatores contribuem significativamente para o aumento dos custos operacionais.

As ressalvas observadas em diferentes instituições ligadas à indústria automotiva ensejam mais estudos e análises do emprego do biodiesel na frota brasileira atual e o laboratório de tribologia da Universidade de Brasília fornece o aparato necessário para a realização de ensaios e análises focadas em desempenho de lubrificantes automotivos.

A metodologia proposta no presente trabalho proporciona:

1. Versatilidade na escolha de materiais para corpos de prova.
2. Possibilidade de escolha de diversos tipos de óleo lubrificantes e a proporção de biodiesel e outros contaminantes.
3. Amplitude de variações de condições de desgaste, como velocidade de deslizamento e carregamento.
4. Flexibilidade de emprego de aparato instrumental, como câmeras termográficas e de alta taxa de registro fotográfico.
5. Possibilidade de análises do óleo após os ensaios.

A gama de combinações que pode ser alcançada indica a aplicabilidade do aparato experimental na averiguação de diversas hipóteses, que podem variar por exemplo o carregamento e a velocidade em função do tempo de ensaio, para simular uma condição específica observada em um determinado motor.

O sólido emprego do aparato experimental do laboratório e o volume de análises realizadas nos últimos anos sedimenta a metodologia desenvolvida. Há garantida repetibilidade, precisão nos resultados, permitindo o emprego dos equipamentos na análise da eficiência de lubrificantes contaminados com biodiesel.

## 5 CONCLUSÕES

O posicionamento das montadoras, fabricantes de peças e entidades automotivas torna patente a necessidade de ampliarmos os estudos e discussões sobre o emprego do biodiesel no Brasil em proporções superiores a 15% em relação ao diesel convencional. Ainda que haja sólida justificativa ambiental, há de se avaliar os impactos deletérios do biocombustível na frota atual e prepará-la de forma adequada a operar com combustíveis com maiores concentrações de biodiesel.

Faz-se necessário portanto ampliar a utilização de equipamentos e aparatos já adquiridos pela Academia no aprofundamento dos estudos quanto a utilização do biodiesel.

A análise da literatura feita no presente trabalho valida a aplicação do equipamento desenvolvido por (MARINHO; GUSTAVO; GALÁRRAGA, [s.d.]) para a avaliação do desempenho de lubrificantes contaminados com biodiesel. O trabalho de GUIMARÃES, 2022 e de (CUERVA MURILO PARRA et al., 2021) combinados, trazem o emprego de metodologias de avaliação de lubrificantes com o aparato de tribômetros do tipo pino-disco.

O desenvolvimento de um Procedimento Operacional Padrão (POP) mostrou-se fundamental para garantir a padronização, a reprodutibilidade e a confiabilidade das atividades experimentais realizadas neste trabalho. A estruturação detalhada das etapas, desde a preparação dos equipamentos e amostras até a coleta e análise dos dados, permitiu minimizar erros operacionais e aumentar a eficiência no manuseio de materiais e equipamentos. Além disso, o POP contribuiu para a sistematização das práticas laboratoriais, assegurando a consistência e a qualidade dos resultados obtidos.

A escolha do método de tratamento dos resultados utilizando triplicatas é essencial para assegurar a confiabilidade e a precisão das análises realizadas. Essa abordagem permite minimizar os efeitos de variabilidades experimentais, garantindo que os dados obtidos sejam representativos e estatisticamente robustos. Ao adotar o cálculo da média dos resultados mais significativos e a análise do desvio padrão, é possível avaliar a consistência dos experimentos e identificar possíveis discrepâncias. Dessa forma, o tratamento estatístico com triplicatas demonstra-se um recurso valioso para validar os resultados e aumentar a confiabilidade das conclusões deste trabalho.

Ainda que haja divergências nas metodologias, há suficientes semelhanças para ensejar o emprego de uma metodologia que estabeleça possibilidade de comparação e subsequente avaliação do desempenho de lubrificantes automotivos contaminados por biodiesel.

No entanto, apesar da versatilidade do aparato experimental do Laboratório de Tribologia da Universidade de Brasília, há limitações quanto à velocidade de rotação do disco, quanto ao carregamento empregado nos ensaios, frequência de aquisição e precisão do aparato de medição (termopar e célula de carga).

O levantamento da infraestrutura de pesquisa disponível na Universidade de Brasília destaca recursos essenciais para a realização deste trabalho, distribuídos em diferentes laboratórios e unidades especializadas. O uso do FTIR, disponível no Laboratório de Análise Instrumental da FGA, permite análises detalhadas das propriedades químicas dos materiais. A Central Analítica do Instituto de Química viabiliza medições avançadas por RMN e pelo analisador elementar CHNS, fundamentais para a caracterização molecular e elementar das amostras. No campo da engenharia automotiva, o Laboratório de Desempenho Automotivo e o Laboratório de Ensaio de Motores, ambos na FGA, oferecem suporte por meio do dinamômetro de chassi DYNOMITE de 12” com freio e do dinamômetro ativo de bancada DYNOMITE AC drive, respectivamente, viabilizando testes de desempenho e eficiência com alta precisão. Essa ampla e integrada infraestrutura é determinante para garantir a qualidade e a abrangência dos resultados obtidos.

Para complementar a metodologia recomenda-se efetuar posteriores análises do óleo após os ensaios, tal como (CUERVA MURILO PARRA et al., 2021) empregou o ferrograma, análise de viscosidade e TBN.

## 6 TRABALHOS FUTUROS

Partindo do presente trabalho, indica-se a realização de simulações computacionais que possibilitem o entendimento de tensões, deformações e distribuições de calor na interface de contato. Recomenda-se para melhor entendimento do comportamento dos contaminantes:

- Análise química do óleo antes e após os ensaios.
- Emprego de diferentes materiais nos corpos de prova.
- Variar a velocidade e distância de deslizamento.

A sequência deste trabalho pode englobar a utilização de diferentes concentrações de biodiesel para aprofundar o debate sobre a utilização do biocombustível no Brasil.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO (ANP). **Matérias-primas utilizadas para a produção de biodiesel (perfil regional). Simpósio Estadual de Agroenergia** Simpósio Estadual de Agroenergia. 2018. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-e-fornecimento-de-biocombustiveis/biodiesel/if/im-2018/processamento-materias-primas-2018.xlsx>>.

Acesso em: 22 abr. 2024

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, G. N. E BIOCMBUSTÍVEIS. **Biodiesel**. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-e-fornecimento-de-biocombustiveis/biodiesel>>. Acesso em: 13 abr. 2024.

ASTM. **Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus 1**. 100 Barr Harbor Drive - USA: [s.n.]. Disponível em: <[https://webstore.ansi.org/standards/astm/astmg9917?gad\\_source=1&gclid=CjwKCAiA\\_OetBhAtEiwAPTeQQ3M1qeuuQN3MGnhJhzCS8QKfCNz2S64nlCctkd0p6P5wYXOsKSIFOXoCAmsQAvD\\_BwE](https://webstore.ansi.org/standards/astm/astmg9917?gad_source=1&gclid=CjwKCAiA_OetBhAtEiwAPTeQQ3M1qeuuQN3MGnhJhzCS8QKfCNz2S64nlCctkd0p6P5wYXOsKSIFOXoCAmsQAvD_BwE)>. Acesso em: 30 jan. 2024.

ASTM. **Standard Terminology Relating to Fatigue and Fracture Testing - ASTM-E1823-23**. 2023.

BAYER, R. G. **Mechanical Wear Fundamentals and Testing, Revised and Expanded**. 2. ed. [s.l.] CRC Press, 2019.

BRUNETTI, F. **Motores de Combustão Interna: Volume 2**. 3. ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 2012. v. 2

CUERVA MURILO PARRA et al. Analysis of the Influence of Contamination in Lubricant by Biodiesel in a Pin-On-Disk Equipment. **Materials Research**, 2021.

CUEVA, E. G. **Desgaste por Deslizamento - Introdução ao Desgaste. 2018**, [s.d.].

DOUGLAS C. MONTGOMERY. **Design and analysis of experiments**. 8. ed. Arizona: John Wiley & Sons, 2008.

GUIMARÃES, N. **Análise do atrito e desgaste sob diferentes condições de carga e lubrificação para um conjunto pino/disco de aço SAE 1045**. Monografia— Brasília - DF: Universidade de Brasília, 2022.

HOLANDA, A.; CÂMARA DOS DEPUTADOS. Biodiesel e inclusão social. **Conselho de Altos Estudos e Avaliação Tecnológica.**, 2004.

HOLMBERG, K.; ERDEMIR, A. **Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions**. University Press. 1 set. 2017. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s40544-017-0183-5>>. Acesso em: 31 jan. 2024

HUTCHINGS, I. **Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials**. 1. ed. [s.l: s.n.].

KETTERMANN, V. **Desgaste e os seus mecanismos**. Disponível em: <<http://engenheirodemateriais.com.br/2017/11/03/desgaste-e-os-seus-mecanismos/>>. Acesso em: 18 abr. 2024.

KIMURA, R. K. **Uso da Técnica de Análise de Óleo Lubrificante em Motores Diesel Estacionários, Utilizando-se Misturas de Biodiesel e Diferentes Níveis de Contaminação do Lubrificante**. Dissertação— Ilha Solteira – SP: Universidade Estadual 2010.

MARINHO, C.; GUSTAVO, C. E.; GALÁRRAGA, C. **SLIDING WEAR OF LUBRICATED AISI 304 STAINLESS STEEL**. [s.l: s.n.].

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - BRASIL. **Relatório de consolidação dos testes e ensaios para validação da utilização de Biodiesel B15 em motores e veículos Grupo de Trabalho para Testes com Biodiesel.** [s.l: s.n.].

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - GOVERNO FEDERAL BRASIL. **Boletim Mensal de Energia.** Brasília: [s.n.].

PACHECO, A. **Estudo do atrito e desgaste em diferentes condições de carga e lubrificação para um conjunto pino-disco de aço 1045.** Monografia — Brasília: Universidade de Brasília, 22 mar. 2022.

PLANET SENSOR. **TERMOPARES PLANET SENSOR - TABELA DE LIMITE DE ERRO.** Disponível em: <[https://planetsensor.com.br/produtos/termopares.php?gad\\_source=1&gclid=Cj0KCQjw2a6wBhCVARIsABPeH1tut\\_V7qmKg2ICPdukH2k4mYS-FPCv1wv4CZhrQGMHH9-\\_ARYPL7fwaAs-2EALw\\_wcB](https://planetsensor.com.br/produtos/termopares.php?gad_source=1&gclid=Cj0KCQjw2a6wBhCVARIsABPeH1tut_V7qmKg2ICPdukH2k4mYS-FPCv1wv4CZhrQGMHH9-_ARYPL7fwaAs-2EALw_wcB)>. Acesso em: 1 abr. 2024.

RATIU, S. A.; MIHON, L.; ARMIONI, M. D. **A Review On The Contamination Of Used Engine Oil.** [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/346573076>>.

RIBEIRO, R.; VENTRELLA, V. A.; GALLEGO, J. **AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO DESGASTE ABRASIVO DE REVESTIMENTOS SOLDADOS DO TIPO Fe-C-Cr UTILIZADOS NA INDÚSTRIA SUCRO ALCOOLEIRA. 60º Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais,** 2005.

S. M. SHANTA; G. J. MOLINA; V. SOLOIU. Tribological Effects of Mineral-Oil Lubricant Contamination with Biofuels: A Pin-on-Disk Tribometry and Wear Study. **Advances in Tribology - Department of Mechanical and Electrical Engineering, Georgia Southern University, Statesboro,** v. 2011, 2011.

SEEG. **O Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG)**. Acesso em: 2 ago. 2024.

STACHOWIAK, G.; BATCHELOR, A. W. **Engineering Tribology**. 3. ed. [s.l.] Butterworth-Heinemann, 2005.

TIER, M. A. D. **Avaliação da resistência ao desgaste do aço AISI M2 nitretado a plasma**. Porto Alegre: [s.n.].

VALVOLINE. **VALVOLINE™ TURBO DIESEL E700**. , 2023.

WJ COMPONENTS. **Célula de Carga 05 KG - WJ Components**. Disponível em: [https://www.wjcomponentes.com.br/sensores/celula-de-carga-5-kg?gad\\_source=1&gclid=Cj0KCQjw2a6wBhCVARIsABPeH1uKaJVHRY7-BPMUXSdIDP63q-OjbXXxW6YNY0IIBNvZtRTqlzP00ucaAhhWEALw\\_wcB](https://www.wjcomponentes.com.br/sensores/celula-de-carga-5-kg?gad_source=1&gclid=Cj0KCQjw2a6wBhCVARIsABPeH1uKaJVHRY7-BPMUXSdIDP63q-OjbXXxW6YNY0IIBNvZtRTqlzP00ucaAhhWEALw_wcB). Acesso em: 1 abr. 2024.