

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA POLITÉCNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE
MATERIAIS

JULIANO RODRIGUES DA SILVA

**ANÁLISE TRIBOLÓGICA DO AÇO-CROMO ASTM 52100 NA PRESENÇA DE
BLENDAS DIESEL - ETANOL POR MEIO DE ENSAIOS DE FRICÇÃO CÍCLICA DE ALTA
FREQUÊNCIA**

Porto Alegre
2024

PÓS-GRADUAÇÃO - *STRICTO SENSU*



Pontifícia Universidade Católica
do Rio Grande do Sul



**ANÁLISE TRIBOLÓGICA DO AÇO-CROMO ASTM 52100 NA
PRESENÇA DE BLENDDAS DIESEL - ETANOL POR MEIO DE
ENSAIOS DE FRICÇÃO CÍCLICA DE ALTA FREQUÊNCIA**

JULIANO RODRIGUES DA SILVA
BACHAREL EM ENGENHARIA MECÂNICA

**DISSERTAÇÃO PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM
ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS**

Porto Alegre

Abril, 2024



**ANÁLISE TRIBOLÓGICA DO AÇO-CROMO ASTM 52100 NA
PRESENÇA DE BLENDS DIESEL - ETANOL POR MEIO DE
ENSAIOS DE FRICÇÃO CÍCLICA DE ALTA FREQUÊNCIA**

JULIANO RODRIGUES DA SILVA

BACHAREL EM ENGENHARIA MECÂNICA

ORIENTADOR: Prof. Dr. CARLOS ALEXANDRE DOS SANTOS

Dissertação realizada no Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais (PGETEMA) da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e Tecnologia de Materiais.

**Porto Alegre
Abril, 2024**

Ficha Catalográfica

S586a Silva, Juliano Rodrigues da

Análise tribológica do aço-cromo ASTM 52100 na presença de blendas diesel - etanol por meio de ensaios de fricção cíclica de alta frequência / Juliano Rodrigues da Silva. – 2024.

95.

Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, PUCRS.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alexandre dos Santos.

1. Desgaste. 2. Fricção Cíclica. 3. Blendas Diesel-Etanol. 4. Aço-Cromo ASTM 52100. I. Santos, Carlos Alexandre dos. II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da PUCRS
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Bibliotecária responsável: Clarissa Jesinska Selbach CRB-10/2051



Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul
ESCOLA POLITÉCNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS

ANÁLISE TRIBOLÓGICA DO AÇO-CROMO ASTM 52100 NA PRESENÇA DE BLENDA DIESEL - ETANOL POR MEIO DE ENSAIOS DE FRICÇÃO CÍCLICA DE ALTA FREQUÊNCIA

CANDIDATO: JULIANO RODRIGUES DA SILVA

Esta Dissertação de Mestrado foi julgada para obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul.

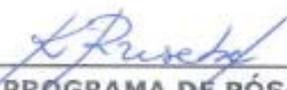


DR. CARLOS ALEXANDRE DOS SANTOS - ORIENTADOR

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
gov.br VICTOR VELHO DE CASTRO
Data: 29/04/2024 17:39:59-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

DR. VICTOR VELHO DE CASTRO - UFRGS



**DRA. KARINA RUSCHEL - PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E
TECNOLOGIA DOS MATERIAIS - PUCRS**

*No meio da dificuldade encontra-se
a oportunidade.*

(Albert Einstein)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha amada família, por acreditarem em mim desde o início e me incentivarem a seguir meus sonhos. Vocês são a minha maior inspiração. A todos que, de alguma forma, apoiaram e motivaram em minha trajetória acadêmica: amigos, professores e colegas. Agradeço por cada palavra de incentivo, por cada gesto de apoio e por cada ombro amigo. Vocês tornaram essa jornada possível.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer à Deus e à minha família, em especial aos meus pais, minha esposa e meu filho.

Agradeço ao professor e mestre Carlos Alexandre dos Santos pela orientação, por cada palavra de incentivo, por cada sugestão construtiva, por cada momento dedicado a me guiar nesta jornada.

À Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, que me oportunizou um curso de excelência, permitindo o aprendizado e proporcionando um ambiente propício para meu desenvolvimento como estudante.

Essa publicação é resultado de um Projeto incentivado pela Lei de Informática Brasileira (Lei nº 8.248, de 1991 e suas atualizações posteriores) e foi desenvolvida sob o Convênio 001/2015 entre a Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul e a HP Brasil Indústria e Comércio de Equipamentos Eletrônicos Ltda.

O presente trabalho foi realizado também com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	7
AGRADECIMENTOS.....	8
LISTA DE FIGURAS	11
LISTA DE TABELAS.....	14
LISTA DE SÍMBOLOS E NOMENCLATURAS	15
RESUMO.....	17
ABSTRACT.....	18
1. INTRODUÇÃO	19
2. OBJETIVOS	22
2.1. Objetivos Específicos	22
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
3.1. Considerações Básicas sobre o Diesel.....	23
3.1.1. Adição do Biodiesel ao Diesel.....	25
3.1.2. Redução do Enxofre no Diesel	26
3.2. Considerações Básicas sobre o Etanol	27
3.3. Características de Miscibilidade da Blenda Diesel – Etanol	28
3.4. Tribologia.....	30
3.4.1. Lubrificação	31
3.4.2. Desgaste.....	35
3.4.3. Atrito	37
3.4.4. Ensaios Tribológicos	38
3.5. Planejamento ou Projeto de Experimentos (DOE)	40
4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	43
4.1. Amostras do Aço ASTM 52100	44
4.1.1. Análise Microestrutural.....	44
4.1.2. Medidas de Dureza	44
4.1.3. Análise da Rugosidade Superficial	45
4.2. Preparação do Par Tribológico	45
4.3. Aquisição e Concepção das Blendas.....	46

4.4. Ensaio Tribol3gicos	47
4.5. Matriz de Experimentos	49
4.6. Medidas da Pista de Desgaste e Determina33o do Volume Desgastado	51
5. RESULTADOS E DISCUSS3ES	53
5.1. Microestrutura, Dureza e Rugosidade Superficial	53
5.2. Coeficientes de Atrito Din4mico	55
5.3. Pistas de Desgaste	65
5.4. Volumes Desgastados	74
5.5. Microscopia Eletr3nica de Varredura	77
5.6. An4lise de Superf3cie de Resposta.....	82
5.6.1. Para o COF	82
5.6.2. Para o Volume Desgastado	84
6. CONCLUS3ES	87
7. REFER4NCIAS BIBLIOGR4FICAS.....	89

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1. Fontes de óleos utilizados na produção de biodiesel (PROPEQ, 2021).	25
Figura 3.2. Curva de Stribeck (FARIAS, 2011).	32
Figura 3.3. Exemplo de superfícies geometricamente semelhantes (HUTCHING, 2017).	32
Figura 3.4. Exemplo de contatos não concordantes (HUTCHING, 2017).	33
Figura 3.5. Descrição esquemática dos quatro principais mecanismos de desgaste (KATO, 2001).	36
Figura 3.6. Representação do modelo de Coulomb para o atrito (STOETERAU, 2004).	38
Figura 3.7. Representação dos diversos tipos de tribômetros e ensaios (BLAU, 2008).	40
Figura 4.1. Fluxograma resumido da metodologia utilizada.	43
Figura 4.2. Rugosímetro portátil SurfTest SJ-210 e amostra posicionada no dispositivo de fixação.	45
Figura 4.3. Dimensões do par esfera-disco: esfera de alumina e disco de aço ASTM 52100.	46
Figura 4.4. Tribômetro do tipo <i>High Frequency Reciprocating Rig</i> (HFRR 4.2).	47
Figura 4.5. Suporte da esfera (a esquerda) e porta-amostra do disco com recipiente para ensaio com lubrificante (a direita).	49
Figura 5.1. Microestrutura do aço ASTM 52100, matriz ferrítica (porção clara) e carbonetos esferoidizados (porção escura).	54
Figura 5.2. Perfil de rugosidade da superfície do disco de aço ASTM 52100.	54
Figura 5.3. Coeficientes de atrito para a blenda JS102 (S10 - 2% de etanol) com carga e distância de: a) 200g e 300m, b) 500g e 100m, c) 500g e 500m, e d) 800g e 300m.	55

Figura 5.4. Coeficiente de atrito para a blenda JS145 (S10 – 4,5% de etanol) com carga de 500g e distância de 300m – ensaios em quadruplicata.....	57
Figura 5.5. Coeficiente de atrito para a blenda JS145 (S10 – 4,5% de etanol) com carga e distância de: a) 200g e 100m, b) 200g e 500m, c) 800g e 100m e d) 800g e 500m.	58
Figura 5.6. Coeficiente de atrito para a blenda JS107 (S10 – 7% de etanol) com carga e distância de: a) 200g e 300m, b) 500g e 100m, c) 500g e 500m e d) 800g e 300m.	59
Figura 5.7. Coeficiente de atrito para a blenda JS502 (S500 – 2% de etanol) com carga e distância de: a) 200g e 300m, b) 500g e 100m, c) 500g e 500m, d) 800g e 300m.	60
Figura 5.8. Coeficiente de atrito para a blenda JS545 (S500 – 4,5% de etanol) com carga e distância de: a) 200g e 100m, b) 500g e 500m, c) 800g e 100m e d) 800g e 500m.	61
Figura 5.9. Coeficiente de atrito para a blenda JS545 (S500 – 4,5% de etanol) com carga de 500g e distância de 300m – ensaios em quadruplicata.....	62
Figura 5.10. Coeficiente de atrito para a blenda JS507 (S500 – 7% de etanol) com carga e distância de: a) 200g e 300m, b) 500g e 100m, c) 500g e 500m, e d) 800g e 300m.	63
Figura 5.11. Pistas desgastadas revelada pelo microscópio ótico na presença da blenda JS102 com carga e distância: a) 200g, 300m; b) 500g, 100m; c) 500g, 500m; d) 800g, 300m.	66
Figura 5.12. Pistas desgastadas revelada pelo microscópio ótico na presença da blenda JS145 com carga e distância: a) 200g, 100m; b) 200g, 500m; c) 800g, 100m; d) 800g, 500m.	67
Figura 5.13. Pistas desgastadas revelada pelo microscópio ótico na presença da blenda JS145 com carga de 500g e distância de 300m.....	68
Figura 5.14. Pistas desgastadas revelada pelo microscópio ótico na presença da blenda JS107 com carga e distância: a) 200g, 300m; b) 500g, 100m; c) 500g, 500m; d) 800g, 300m.	69
Figura 5.15. Pistas desgastadas revelada pelo microscópio ótico na presença da blenda JS502 com carga e distância: a) 200g, 300m; b) 500g, 100m; c) 500g, 500m; d) 800g, 300m.	70

Figura 5.16. Pistas desgastadas revelada pelo microscópio ótico na presença da blenda JS545 com carga e distância: a) 200g, 100m; b) 200g, 500m; c) 800g, 100m; d) 800g, 500m.	71
Figura 5.17. Pistas desgastadas revelada pelo microscópio ótico na presença da blenda JS545 com carga de 500g e distância de 300m.....	72
Figura 5.18. Pistas desgastadas revelada pelo microscópio ótico na presença da blenda JS507 com carga e distância: a) 200g, 300m; b) 500g, 100m; c) 500g, 500m; d) 800g, 300m.	73
Figura 5.19. Relação entre diferentes percentuais de etanol, com mesma carga (200g) e distância (300m) e o volume desgastado.	75
Figura 5.20. Relação entre diferentes cargas (200g e 800g), com o mesmo percentual de etanol 4,5%, mesma distância 500m e o volume desgastado.....	76
Figura 5.21. Relação entre diferentes distâncias (100m e 500m), com o mesmo percentual de etanol 4,5%, mesma distância 500m e o volume desgastado.....	77
Figura 5.22. JS102 com carga de 200g e distância de 300m.....	78
Figura 5.23. JS102 com carga de 500g e distância de 100m.....	79
Figura 5.24. JS107 com carga de 500g e distância de 100m.....	80
Figura 5.25. JS502 com carga de 500g e distância de 100m.....	81
Figura 5.26. JS507 com carga de 500g e distância de 500m.....	82
Figura 5.27. Resultados da superfície de respostas do DOE, para os restados do COF.....	83
Figura 5.28. Main Effect Plot em função da variável COF.....	84
Figura 5.29. Resultados da superfície de respostas do DOE, para os resultados dos volumes desgastados.....	85
Figura 5.30. Main Effect Plot em função da variável volume desgastado.	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1. Identificação das blendas dos combustíveis.	47
Tabela 4.2. Características e faixas de operação do tribômetro HFRR 4.2.	48
Tabela 4.3. Matriz de experimentos.	50
Tabela 5.1. Volumes desgastados em função das blendas, cargas e distâncias.....	71

LISTA DE SÍMBOLOS E NOMENCLATURAS

AFM	Microscopia de Força Atômica
AIE	Agência Internacional de Energia
ANP	Agência Nacional do Petróleo e Biocombustível
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i> (Sociedade Americana de Testes de Materiais)
BEX	Nome das blendas de óleo diesel derivado do petróleo e um percentual de etanol
COF	Coefficiente de atrito
JS**2	Blenda com adição de 2% de etanol no diesel (v/v)
JS*45	Blenda com adição de 4,5% de etanol no diesel (v/v)
JS**7	Blenda com adição de 7% de etanol no diesel (v/v)
CNPE	Conselho Nacional de Política Energética
CO ₂	Dióxido de Carbono
Cr	Cromo
DOE	<i>Desing of Experiments</i> (Projeto de Experimentos)
E27	Gasolina comum com adição de 27% e álcool anidro (v/v)
EAC	Etanol Anidro Combustível
EHC	Etanol Hidratado Combustível
EHL	Elastohidrodinâmica
EP	Extrema Pressão
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
HC	Hidrocarbonetos
HFRR	<i>High Frequency Reciprocating Rig</i> (Fricção Cíclica em Alta Frequência)
LAMAT	Laboratório de Materiais da PUCRS
m	Metro
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
MP	Material Particulado
NO _x	Óxidos de Nitrogênio
ONU	Organização das Nações Unidas

PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
PNPB	Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel
PPM	Partes por Milhão
PRoPeq	Pró-Reitoria de Pesquisa da UFMT
R _a	Rugosidade Média
R _z	Altura máxima do perfil da rugosidade
RenovaBio	Programa Nacional de Biocombustíveis
S10	Diesel Comercial com o Teor de Enxofre de 10 ppm
S500	Diesel Comercial com o Teor de Enxofre de 500 ppm
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i> (Sociedade Americana de Engenheiros Automotivos)
SO ₂	Dióxido de Enxofre
SO _x	Óxidos de Enxofre
UFMT	Universidade Federal de Mato Grosso
μ _d	Coefficiente de atrito dinâmico

RESUMO

RODRIGUES DA SILVA, Juliano. **ANÁLISE TRIBOLÓGICA DO AÇO-CROMO ASTM 52100 NA PRESENÇA DE BLENDS DIESEL-ETANOL POR MEIO DE ENSAIOS DE FRICÇÃO CÍCLICA DE ALTA FREQUÊNCIA**. Porto Alegre. 2024. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL.

Devido ao aumento na demanda do consumo por óleo diesel no transporte rodoviário e em diversos segmentos industriais, aliado a necessidade de mitigação dos impactos ambientais originados pela queima do diesel fóssil, cresce o interesse em ampliar a participação do mercado de combustíveis renováveis. Em função disto, este trabalho tem o objetivo de analisar o comportamento do desgaste por fricção cíclica em alta frequência do aço-cromo ASTM 52100 na presença de blends de diesel comercial (S500 e S10) com adições de etanol hidratado combustível (EHC) comercial nas porcentagens de 2%, 4,5% e 7% (v/v). As análises foram realizadas baseadas na norma ASTM G 133 (*Standard Test Method for Linearly Reciprocating Ball-on-Flat Sliding Wear*) utilizando um tribômetro pino-sobre-disco do tipo HFRR (*High Frequency Reciprocating Rig*), com pino de alumina (contra-corpo) e o disco de aço ASTM 52100 (corpo), frequência de 50 Hz, carga aplicada de 2, 5 e 8 N e distâncias percorridas de 100, 300 e 500 m. Antes dos ensaios, as amostras foram submetidas a lixamento e polimento, padronizando as características de planicidade e rugosidade superficial. Foram obtidas curvas dos comportamentos das forças e dos coeficientes de atrito durante os ensaios. As pistas de desgaste foram analisadas por microscopia ótica para determinação das dimensões das pistas e volumes desgastados, enquanto a microscopia eletrônica de varredura foi utilizada para identificar os mecanismos de desgaste associados. A presente avaliação demonstra que o desgaste apresenta relação direta com o aumento da carga aplicada, conforme análise realizada. Observou-se, que o desgaste tende, com relação mais fraca, a se elevar com o crescimento do deslocamento e com o aumento no percentual de etanol.

Palavras-Chaves: Desgaste, Fricção Cíclica, Blends Diesel-Etanol, Aço-Cromo ASTM 52100.

ABSTRACT

RODRIGUES DA SILVA, Juliano. **TRIBOLOGY ANALYSIS OF THE ASTM 52100 CHROMIUM STEEL IN THE PRESENCE OF DIESEL-ETHANOL BLENDS BY HIGH FREQUENCY RECIPROCATING RIG TESTS**. Porto Alegre. 2024. Master Dissertation. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL.

Due to the increase in diesel consumption in road transport and in several industrial segments, linked to the need to mitigate the environmental impacts caused by the use of fossil diesel, interest is growing in expanding the share of renewable fuels in the market. Thus, this work aims to analyze the behavior of fretting wear of ASTM 52100 chromium-steel in the presence of mixtures of commercial diesel (S500 and S10) with additions of commercial hydrated ethanol fuel (EHC) in percentages of 2%, 4.5% and 7% (v/v). The analyzes were carried out based on the ASTM G 133 standard (Standard Test Method for Linearly Reciprocating Ball-on-Flat Sliding Wear) using a pin-on-disc tribometer, type HFRR (High Frequency Reciprocating Rig), with an alumina pin as a counter-body, and ASTM 52100 chrome-steel discs as body, frequency of 50 Hz, applied load of 2, 5 and 8 N and sliding distances of 100, 300 and 500 m. Before testing, the samples were subjected to grinding and polishing to standardize the characteristics of flatness and surface roughness. Tangential forces and friction coefficients were obtained during the tests. Wear tracks were analyzed using optical microscopy to determine track dimensions and worn volumes, while scanning electron microscopy was used to identify associated wear mechanisms. This evaluation demonstrates that wear is directly related to the increase in applied load, according to the analysis carried out. It was observed that wear tends, with a weaker relationship, to increase with the increase in displacement and the increase in the percentage of ethanol.

Keywords: Wear, High Frequency Reciprocating Rig, Diesel-Ethanol blends, ASTM 52100 chromium-steel.

1. INTRODUÇÃO

Com o crescimento do capitalismo, juntamente com a revolução industrial e o aumento populacional, houve uma revolução nos meios de transporte, deixando de lado a tração animal para a utilização de transportes utilizando veículos com motores a combustão interna abastecidos com combustíveis fósseis, aumentando desta forma os níveis de emissões de gases poluentes na atmosfera, tais como o dióxido de carbono (CO₂), dióxido de enxofre (SO₂), hidrocarbonetos diversos (HC) e material particulado (MP).

A parcela de emissões dos gases poluentes provenientes de veículos é uma das maiores, cerca de 30%, juntamente com a parcela provenientes das atividades industriais (PNUMA, 2020). Este fato é justificado pelo aumento constante na frota de veículos circulantes nas ruas e rodovias, e em especial, nos grandes centros urbanos (ONU, 2022). O aumento do transporte de cargas e passageiros leva ao aumento direto da utilização de combustíveis fósseis em veículos pesados, trens e navios, principalmente o diesel, levando ao aumento de emissões dos gases (AIE, 2023). Para limitar o aumento de gases veiculares poluentes, na década 1970 foram criadas normatizações para regulamentar os níveis de emissões de gases gerados por veículos com motor a combustão interna, que por sua vez pressionou a indústria automotiva a evoluírem os sistemas de controle de emissões (BOSCH, 2005).

Simultaneamente, existe grande interesse em pesquisas na área de combustíveis renováveis, diminuindo por sua vez a dependência de combustíveis fósseis, os quais são não-renováveis e limitados. A parcela de combustíveis renováveis no Brasil é aproximadamente 25% de todos os combustíveis utilizados no setor rodoviário. O país tem um compromisso de aumentar a participação de combustíveis renováveis no setor rodoviário para 35% até 2030 (EPE, 2022). Para atingir essa meta, o Governo Brasileiro está investindo em políticas para promover o

uso de combustíveis renováveis, como o RenovaBio, que é a Política Nacional de Biocombustíveis, instituída pela Lei nº 13.576/2017. Esse empenho do Brasil na utilização de combustíveis renováveis começou na década de 30, quando um decreto estipulava a obrigatoriedade da mistura de álcool anidro em toda gasolina comercializada no Brasil. No entanto, somente no início da década de 70 foi lançado o programa Pró-álcool, pelo Decreto nº 76.593, que tinha como objetivo reduzir a frota nacional de carros movidos a gasolina, abrindo espaço para veículos abastecidos a álcool e, por consequência, estimular a produção do álcool. Atualmente é obrigatória a adição de 27% de álcool (E27) em toda gasolina comercializada no Brasil (ANP, Lei no 3.834/2015).

A utilização em massa do biodiesel ocorreu no ano de 2005, quando foi criado o Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB) no qual estabeleceu métricas para o uso do biodiesel. Entre os anos de 2008 e 2012, compulsório uso de 2% de biodiesel em todo diesel comercial no Brasil, no ano de 2013 foi compulsório o aumento da porcentagem de biodiesel, deixando o valor anterior e passando para 5% (BRASIL, 2009). Em 2014 passou para 7% e no momento presente, o Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) aumentou a participação do biodiesel, passando de 7% para 10% (BIODIESELBR, 2022).

Paralelo as pesquisas em combustíveis renováveis, existem diversos estudos sobre suas consequências. Desta forma, fomenta o número de pesquisas por tribologia e materiais, devido às condições que o motor de combustão interna sofre quando alimentado com novos combustíveis.

Os novos combustíveis apresentam composições químicas que buscam minimizar os danos ao meio ambiente, e em especial, a eliminação de elementos como chumbo e enxofre. No caso do diesel combustível, o enxofre presente na composição causa a formação de óxidos de enxofre (SO_x) após a combustão, que contribuem para a poluição atmosférica e a chuva ácida. Por este motivo, a redução do teor de enxofre no diesel é uma medida importante para a proteção do meio ambiente. No entanto, a redução do teor de enxofre no diesel também pode afetar a lubrificidade do combustível (RABINOWICZ, 2014).

Dentre os diversos componentes destaca-se o bico injetor de combustível em veículos com motor diesel, submetido a mudanças de combustíveis diesel, biodiesel e suas blendas. Os processos de interação do fluido na atomização do combustível e a alta pressão no momento da combustão, amplia as chances de danos ao bico injetor como desgaste, corrosão, cavitação, entupimento e erosão, potencializando a possibilidade de falha (OLIVEIRA, 2011). Nesta situação é necessário entender e quantificar os comportamentos/respostas ao desgaste dos materiais envolvidos, relacionando com seu tempo de serviço, pressão, velocidade, temperatura e demais variáveis.

Um fator muito relevante para a conservação dos componentes do motor de ignição por compressão é a viscosidade e lubrificidade do combustível (HANSEN, 2001). A lubrificidade do combustível ajuda na preservação de componentes que sofrem fricção no sistema de alimentação (bicos e bomba de combustível), sendo que a superfície desses componentes deve ser protegida por uma fina camada de lubrificante, e o único lubrificante destes componentes é o próprio combustível.

Assim, o escopo deste trabalho foi realizar uma análise tribológica do aço ASTM 52100, por meio de ensaios de desgaste por fricção cíclica em alta frequência no equipamento tribômetro pino-sobre-disco do tipo HFRR (High Frequency Reciprocating Rig), para avaliar o efeito de diferentes blendas diesel-etanol sobre a resistência ao desgaste do aço.

O trabalho foi dividido na seguinte sequência: O Capítulo 1 aborda uma breve introdução ao tema proposto, enquanto o Capítulo 2 apresenta o objetivo geral e os específicos. O Capítulo 3 apresenta uma revisão da literatura dos principais tópicos necessários para abordagem do tema. O Capítulo 4 mostra o procedimento experimental, sendo os resultados e as discussões expostas no Capítulo 5. No Capítulo 6 são compilados as principais conclusões e o Capítulo 7 dedica-se a apresentação de algumas propostas para futuros trabalhos.

2. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo realizar uma análise tribológica do aço-cromo ASTM 52100 na presença de diferentes blendas diesel-etanol, por meio de ensaios de desgaste pino-sobre-disco por fricção cíclica em alta frequência no equipamento tribômetro HFRR (*High Frequency Reciprocating Rig*), obtendo respostas em relação aos coeficientes de atrito, volumes desgastados e mecanismos de desgaste do sistema tribológico.

2.1. Objetivos Específicos

Como objetivos específicos, foram determinados os listados a seguir:

- Realizar ensaios de desgaste em amostras do aço-cromo ASTM 52100 na presença dos diesels comerciais S500 e S10, e em blendas com adições de 2%, 4,5% e 7% de etanol hidratado combustível (EHC) comercial, com diferentes cargas aplicadas (200g, 500g e 800g) e distâncias percorridas (100m, 300m e 500m);
- Determinar parâmetros de desgaste como coeficiente de atrito dinâmico durante ensaios e volume desgastado após os ensaios;
- Identificar os mecanismos de desgaste por meio de observações das superfícies de desgaste por microscopia eletrônica de varredura;
- Verificar correlação(ões) entre o(s) combustível(eis) utilizado(s) com as características dos desgastes observados nas amostras.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo dedica-se à apresentação dos principais temas relacionados ao combustível diesel, combustível etanol, bem como à tribologia e planejamento de experimentos.

3.1. Considerações Básicas sobre o Diesel

O óleo diesel é um combustível fóssil derivado do petróleo, utilizado em motores de combustão interna com ignição por compressão. É um combustível de alta eficiência energética, com alto poder calorífico. É um combustível líquido, de coloração amarelada, com odor característico. Produzido pela destilação fracionada do petróleo, possui ponto de ebulição entre 180°C e 360°C e ponto de congelamento próximo dos 0°C (LANE, 1980), formado por átomos de carbono e hidrogênio com baixo teor de oxigênio, nitrogênio e enxofre. A cadeia de hidrocarbonetos pode chegar a vinte e oito átomos de carbono (OLIVEIRA, 2008), sendo que os hidrocarbonetos parafínicos de cadeia aberta asseguram a característica de boa ignição na combustão de motores por ignição por compressão. Em geral, apresenta densidade de cerca de 0,82 a 0,85 g/cm³ a 20°C. Não solúvel em água, mas mistura-se com a maioria dos solventes orgânicos.

Pelo motivo de seu baixo custo e grande disponibilidade a décadas, o petróleo, matéria prima do combustível para produção diesel, foi a principal fonte de energia do mundo, o diesel foi empregado nas mais diversas áreas de transporte, tais como automóveis, caminhões, ônibus, navios e geradores. Contudo, com o passar do tempo a disponibilidade do petróleo, diminuiu. Além de suas maiores jazidas estarem localizadas em regiões politicamente confusas (OLIVEIRA, 2008).

No entanto, o diesel também é um combustível com um alto impacto ambiental, contribuindo para as emissões de gases de efeito estufa e de poluentes atmosféricos. A queima de diesel libera material particulado, óxidos de nitrogênio (NO_x) e óxidos de enxofre (SO_x) na atmosfera. O material particulado é uma mistura de partículas sólidas e líquidas que pode causar problemas respiratórios, como asma e bronquite. Os NO_x contribuem para a formação do ozônio troposférico, um poluente que pode causar problemas respiratórios e irritação nos olhos. Por isso, o desenvolvimento de combustíveis alternativos ao diesel, como o biodiesel, tem sido uma área de pesquisa importante (AIE, 2023).

A Agência Nacional do Petróleo e Biocombustível (ANP), mediante a Resolução de nº 65 de 09/12/2011, classifica o combustível diesel rodoviário, conforme: "*Art. 3º Fica estabelecido, para efeitos desta Resolução, que os óleos diesel A e B deverão apresentar as seguintes nomenclaturas, conforme o teor máximo de enxofre:*

- a) *Óleo diesel A S10 e B S10: combustíveis com teor de enxofre, máximo de 10 mg/kg.*
- b) *Óleo diesel A S50 e B S50: combustíveis com teor de enxofre, máximo de 50 mg/kg.*
- c) *Óleo diesel A S500 e B S500: combustíveis com teor de enxofre, máximo de 500 mg/kg.*
- d) *Óleo diesel A S1800 e B S1800: combustíveis com teor de enxofre, máximo de 1800 mg/kg."*

O combustível diesel é classificado como modelo A (sem adição de biodiesel, consequentemente puro) ou do modelo B (com adição de biodiesel), sendo o único permitido no Brasil, com adição de 12% de biodiesel, esse percentual foi definido em março de 2023 (CNPE, 2023).

O futuro do diesel está intimamente ligado à busca por soluções mais ecológicas. Pesquisas contínuas concentram-se em melhorar a eficiência dos motores, reduzir emissões e explorar combustíveis alternativos para garantir a sustentabilidade a longo prazo (AIE, 2023).

3.1.1. Adição do Biodiesel ao Diesel

O biodiesel aparece como uma opção favorável, destacando-se por sua origem renovável e menor impacto ao meio ambiente. O biodiesel é um combustível derivado de fontes renováveis, como óleos vegetais, gorduras animais ou até mesmo algas. Sua produção é realizada mediante a mistura de óleo vegetal ou gordura animal em metanol ou etanol, na presença de um catalisador, um processo que transforma esses óleos em ésteres metílicos ou etílicos, que são os componentes principais do biodiesel (ALVES, 2022). Suas propriedades físicas são semelhantes ao diesel comercial, porém o biodiesel. Com ponto de ebulição entre 180°C e 360°C e ponto de congelamento próximo dos -20°C, de maneira geral apresenta densidade de cerca de 0,82 a 0,85 g/cm³ a 20°C e potência calorífica: de 44,2 MJ/kg.

A indústria do biodiesel no Brasil possui grande relevância graças à vasta biodiversidade, recursos hídricos e larga produção de grãos, com potencial de extração do óleo vegetal. Na Figura 3.1 é demonstrado as principais fontes de biodiesel no Brasil.



Figura 3.1. Fontes de óleos utilizados na produção de biodiesel (PROPEQ, 2021).

O óleo de soja é o mais utilizado como matéria prima na produção do biodiesel, no entanto, medidas governamentais vem tentando incentivar uma maior diversificação das oleaginosas usadas, como o óleo de mamona e o de palma, com o objetivo de promover regiões semi-áridas do Nordeste a participar dessa

economia, oportunizando a independência da indústria do biodiesel dos agronegócios de soja (PROPEQ, 2021).

3.1.2. Redução do Enxofre no Diesel

A busca por combustíveis mais limpos e sustentáveis tem levado a mudanças significativas nas especificações dos combustíveis diesel em todo o mundo. Um dos principais focos tem sido a redução do teor de enxofre no diesel, uma medida que não apenas beneficia o meio ambiente, mas também impulsiona avanços tecnológicos nos motores diesel permitindo o uso de tecnologias avançadas de controle de emissões como: catalisadores de oxidação, filtros de partículas diesel e sistemas de redução catalítica seletiva. O enxofre presente no diesel é uma fonte direta de poluentes atmosféricos, como dióxido de enxofre (SO₂) e material particulado. A redução do enxofre contribui para a melhoria da qualidade do ar, reduzindo a formação de chuva ácida, a poluição atmosférica e os riscos à saúde humana, causando irritação nos olhos, no nariz e na garganta, e pode agravar problemas respiratórios, como asma e bronquite, especialmente em áreas urbanas (MURO, 2014).

A adição de enxofre no diesel, tem a como objetivo agir como um lubrificante, proporcionando uma camada protetora nas superfícies metálicas. Isso ocorre porque o enxofre ajuda a reduzir o atrito entre as peças do motor, o enxofre forma filmes de sulfeto que ajudam a reduzir o atrito e o desgaste entre as peças móveis do motor. A redução do teor de enxofre no diesel leva a um aumento do atrito e do desgaste das peças do motor, o que resulta em redução da eficiência do motor, aumento do consumo de combustível e redução da vida útil do motor. O enxofre no diesel tem a atribuição de neutralizar os ácidos formados durante a combustão do diesel, auxilia a estabilizar termicamente o diesel evitando a formação de compostos voláteis que aumentam o atrito e reduz a polaridade do combustível diesel melhorando sua molhabilidade (RABINOWICZ, 2014).

3.2. Considerações Básicas sobre o Etanol

O etanol, também conhecido como álcool etílico, é derivado do processo de fermentação de amidos e açúcares. É uma substância pura, incolor, líquida, de fragrância aromática, de paladar ardente, volátil, composta apenas por uma molécula de C_2H_5OH , com uma densidade de cerca de $0,789 \text{ g/cm}^3$ a 20°C e poder calorífico de $26,9 \text{ MJ/kg}$. É solúvel em água e mistura-se com a maioria dos solventes orgânicos. O ponto de congelamento do etanol é de $-114,1^\circ\text{C}$ e o ponto de ebulição é de $78,5^\circ\text{C}$ a 760 mmHg . Possui um excelente poder antidetonante, característica que o faz ser misturado na gasolina comercial tipo A. O etanol é utilizado para dissolver substâncias sólidas ou líquidas. É amplamente utilizado como solvente para a produção de cosméticos, perfumes e medicamentos. Como aditivo para bebidas alcoólicas, o etanol é utilizado como um tipo de álcool destilado que é adicionado a uma variedade de bebidas, incluindo vodca, rum, gin e whisky (ÚNICA, 2008)

É o biocombustível mais produzido no mundo e o Brasil é o segundo maior produtor de etanol (RFA, 2017), enquanto o primeiro lugar fica com os Estados Unidos. A maior fonte de etanol do Brasil é a cana de açúcar, enquanto nos Estados Unidos é o milho.

Segundo a resolução ANP nº. 36, o EHC (Etanol Hidratado Combustível) deve ser comercializado incolor, enquanto o EAC (Etanol Anidro Combustível) deve ser adicionado um corante laranja. O EHC é utilizado de forma pura na combustão em motores de ciclo Otto, contendo um teor alcóolico entre $92,6^\circ$ a $93,8^\circ$.

Dentre os biocombustíveis viáveis, o etanol é o que tem maior probabilidade de fazer parte da matriz energética em diversos países. Este fato se deve ao alto rendimento do etanol produzido a partir da cana de açúcar, onde 1 hectare de terra pode originar até 7500 litros de etanol, enquanto o biodiesel produzido a partir da soja com a mesma área de terra produz 600 litros (ÚNICA, 2008).

A utilização de etanol como um biocombustível é muito atraente, tendo em vista a diminuição na extração e no consumo de petróleo e na mitigação das emissões de

poluentes na atmosfera (CHEN, 2011). A motivação essencial para a utilização de blendas de diesel e etanol como combustível de motores de ignição por compressão está na mitigação dos níveis de gases nocivos ao meio ambiente durante a queima do combustível, quando comparado com motores que tem sua alimentação apenas por óleo diesel. As maiores reduções estão no material particulado, além de diminuição nos óxidos de nitrogênio (NO_x), devido a diminuição da temperatura de da câmara de combustão (ZHIQING, 2022).

Pesquisas para acrescentar etanol no óleo diesel são realizadas desde o final da década de 70, devido à crise do petróleo, alavancando a utilização do etanol como combustível no Brasil (VALLE, 2000). No trabalho de Oliveira *et. al* (OLIVEIRA, 2007) foi analisado o comportamento da lubricidade do óleo diesel com adição de etanol. Notou-se uma incoerência nos resultados de desgaste obtidos em relação aos inicialmente esperados em função das composições das blendas com etanol. Dois motivos foram levantados: o primeiro deve-se a evaporação do etanol em temperaturas maiores e a segunda advinda de mudanças de interação entre o metal do disco e o filme de combustível, levando a adaptações no ensaio normalizado, como a renovação constante da blenda durante o ensaio.

3.3. Características de Miscibilidade da Blenda Diesel – Etanol

De acordo com o trabalho de Gerdes (2001), o emprego de etanol como combustível principal ou parcial em motores a combustão por compressão pode ser feito das seguintes maneiras: (1) total, 100% de etanol, fazendo-se necessário a adição de um fornecedor de cetano, para aumentar a capacidade do combustível ter uma ignição por compressão; (2) pela atuação de fumigação, de modo a realizar a pulverização direta do etanol no coletor de admissão do motor em funcionamento com uma ínfima quantidade de diesel; (3) adicionando etanol diretamente na câmara de combustão; (4) na configuração de uma solução, misturados por agitação; e (5) na forma de emulsão. Das possibilidades apresentadas, apenas as duas últimas se adequam ao tema da pesquisa, tendo em vista que as demais o diesel e o etanol não interagem diretamente.

Quando se trata da mistura de diesel e etanol, as características de miscibilidade podem ser influenciadas por vários fatores, incluindo a proporção de diesel e etanol na mistura, a temperatura e a pressão (GERPES, 2001). As blendas de diesel e álcool anidro são limitadas pela proporção de até 20% de volume de álcool em relação ao volume da blenda, devido à alta sensibilidade à presença de água, já que quantidades de água próximas a 0,5% em volume instaura uma separação do álcool no diesel, provocando a flutuação do diesel na solução. Com acréscimo de um co-solvente, as blendas de diesel e álcool se tornam emulsões, tornando-se mais toleráveis à presença de água. O propósito do mesmo é promover a homogeneização entre a blenda diesel e álcool (NIGRO, 1998).

Inúmeras características do óleo diesel são mudadas a partir da adição de álcool. Pode-se ser citado o aumento do poder calorífico, a diminuição do número de cetano e o aumento da volatilidade (GERDES, 2001). Ao ser destilada uma determinada mistura de etanol e diesel, o aumento da volatilidade em relação ao diesel puro é melhor observado a 10% do volume recuperado, pois é nessa faixa em que o etanol se vaporiza. Este fato pode trazer consequências desejáveis e indesejáveis. No que tange às más consequências, o etanol, ao vaporizar pode causar obstrução do bico injetor, por conta da alta pressão de vapor na linha de retorno do combustível. Entretanto, este problema pode ser solucionado com a aplicação de válvulas de alívio. Contudo, a alta volatilização do álcool etílico proporciona a mistura do combustível com o ar de maneira mais rápida e homogênea a baixas temperaturas. Isso desfavorece o excesso de combustível na câmara de combustão, minimizando a formação de fuligem e material particulado, durante a sua queima (JOAQUIM, 2007).

Fang *et al.* (2013) estudaram os efeitos que a blenda de diesel e etanol pode causar na combustão. Observaram que, quanto maior a quantidade de etanol presente na mistura, maior a taxa de liberação de calor e maior o atraso na ignição, por consequência do menor número de cetano do etanol. À medida que o atraso de ignição aumenta, o tempo de mistura ar/combustível é maior, o que leva a queima de combustível na primeira fase da combustão em maior quantidade, o que ocasiona um aumento na taxa de liberação de calor.

3.4. Tribologia

A tribologia é a ciência que estuda a relação de superfícies e seus temas relativos, analisando os resultados das características dos filmes de fluidos formados em contato. Comumente conhecida como a ciência que estuda a lubrificação, desgaste e atrito, compreendendo os estudos da interação física e química de componentes, disposição de forças, conversão de energia e mudança de topografia (BHUSHAN, 2002).

O objetivo da tribologia é compreender esses fenômenos para melhorar a eficiência e a durabilidade de dispositivos e mecanismos. Em resumo, a tribologia é uma ciência importante para a engenharia e a tecnologia, pois ajuda a compreender e resolver problemas relacionados ao atrito, ao desgaste e à lubrificação em máquinas e equipamentos. Existem várias técnicas e ferramentas utilizadas na tribologia para avaliar o atrito, o desgaste e a lubrificação, incluindo ensaios de atrito, ensaios de desgaste, microscopia e análise química. Além disso, a tribologia também estuda a relação entre a microestrutura dos materiais e suas propriedades, incluindo a dureza, a resistência à fadiga e a resistência ao desgaste (JABER, 2019).

Nos sistemas tribológicos, o atrito e o desgaste podem ser controlados e reduzidos por meio de lubrificação adequada, uso de revestimentos tribológicos, seleção de materiais com propriedades tribológicas desejáveis e projeto mecânico otimizado. Além disso, ela também está relacionada às questões de sustentabilidade, pois o desgaste de componentes tribológicos pode levar a perda de material, aumento de consumo de energia e aumento de emissões de poluentes.

3.4.1. Lubrificação

A lubrificação é uma condição muito importante no mecanismo do desgaste. Ela é a capacidade de reduzir o atrito e o desgaste as superfícies em contato. A lubricidade é uma grandeza do poder de lubrificação de um elemento. Os lubrificantes têm a função de introduzir entre as superfícies de deslizamento uma camada de material com resistência ao cisalhamento menor que a das superfícies (HUTCHINGS, 1992).

Para não haver desgaste, um filme contínuo de óleo deve estar presente entre as duas superfícies evitando que as duas superfícies se toquem (ORTEGA, 2014). Porém, se o filme for cisalhado, o desgaste poderá ocorrer. O conceito de lubricidade se caracteriza pela diferença no atrito, sob condições de lubrificação de uma camada limite, quando alguns fatores do sistema são mantidos constantes. Por definição, quanto maior a lubricidade, menor será o atrito (FELTER, 2007), isto significa que a lubricidade é o atributo de um fluido ou sólido de impedir a fricção e, por consequência, o desgaste (MATTOS, 2012). Segundo definição da ASTM G133, quanto maior a lubrificação, menor será o índice de desgaste. O ensaio de laboratório tem o menor custo e é o mais eficiente, pois consegue diminuir o número de horas sem a necessidade de grandes volumes de lubrificantes (KNOTHE et al., 2006).

Existem diversos tipos de classificação do regime de lubrificação, entre eles estão: elastohidrodinâmica, hidrodinâmica, limítrofe e misto. Sendo estes demonstrados na Figura 3.2. Estes regimes são classificados de acordo com a espessura do filme de lubrificante (KUO, 1996). Observa-se na Figura 3.2 que à medida que o filme de lubrificante aumenta, o coeficiente de atrito diminui crescendo logo após devido a viscosidade do lubrificante.

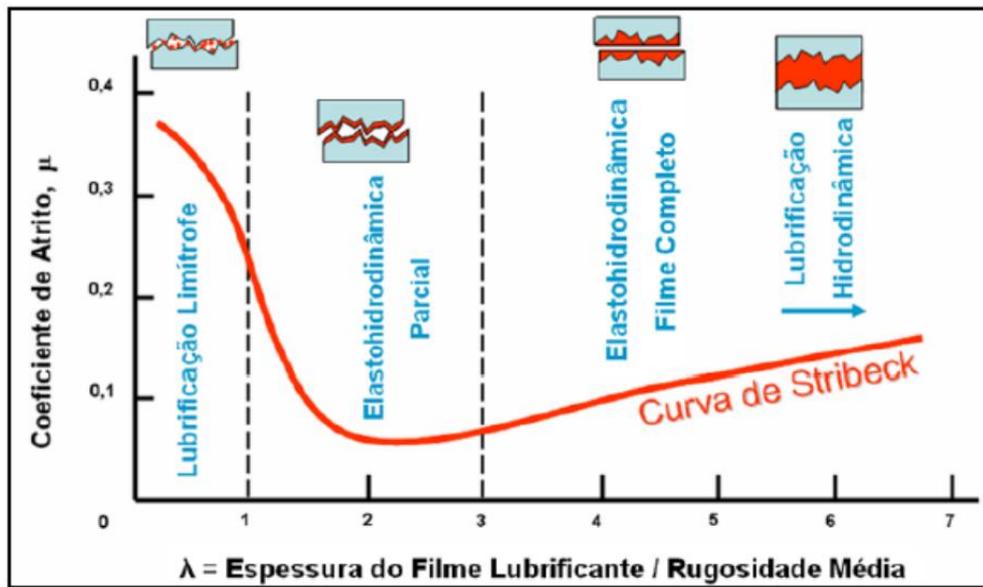


Figura 3.2. Curva de Stribeck (FARIAS, 2011).

A lubrificação hidrodinâmica é considerada como um dos regimes de lubrificação mais importantes da tribologia devido a seu desempenho, que este regime de lubrificação oferece: menor atrito e por consequência menor desgaste. Este tipo de lubrificação ocorre quando duas superfícies em deslocamento relativo são separadas por uma película de um fluido lubrificante. A lubrificação hidrodinâmica é aquela que ocorre em mancais de deslizamento. Para que ocorra lubrificação hidrodinâmica, as superfícies opostas devem ser geometricamente semelhantes, conforme Figura 3.3, separadas por somente um pequeno espaço, preenchido pelo lubrificante, sobre uma área relativamente grande.

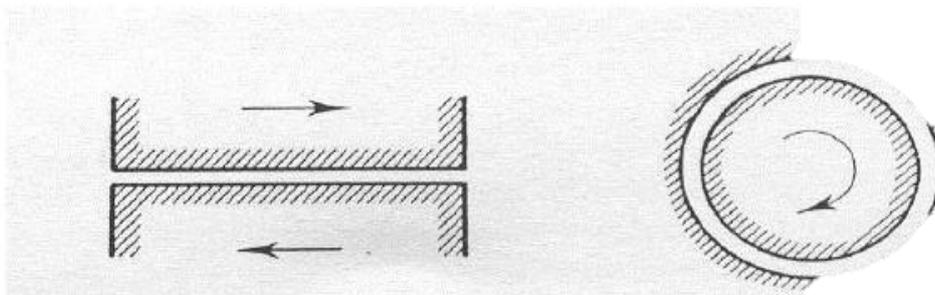


Figura 3.3. Exemplo de superfícies geometricamente semelhantes (HUTCHING, 2017).

Para o regime de lubrificação elastohidrodinâmica (EHL), a característica é a pressão transmitida pelo fluido que é elevada o suficiente deformando elasticamente os corpos. O corpo é pressionado contra o fluido com uma intensidade tal que causa a

deformação elástica do corpo e do contra corpo. Nessas condições, a viscosidade do fluido aumenta, conforme aumenta a carga normal. Segundo Shigley (2016), as características desse regime dependem da rugosidade da superfície, da pressão do filme fluido, da carga normal, da dureza e da rigidez das asperezas, entre outros aspectos.

A lubrificação EHL é mais difícil de formar um filme completo, pois as superfícies não são conformes, como mostra a Figura 3.4 e tendem a expelir o lubrificante ao invés de permitir a sua entrada (NAVES, 2016).

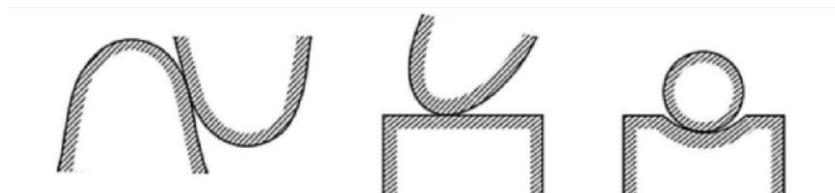


Figura 3.4. Exemplo de contatos não concordantes (HUTCHING, 2017).

A distinção entre EHL e a lubrificação hidrodinâmica é que no regime de lubrificação elastohidrodinâmico ocorre deformação elástica das superfícies em contato, o contato não está conforme e o regime de lubrificação hidrodinâmico não ocorre essa deformação elástica entre as superfícies e o contato é conforme (QUEIROGA, 2010)

O regime limítrofe é a forma mais acentuada de lubrificação por filme fino em que toda a carga é suportada pela rugosidade lubrificadas (resultando em deformação plástica e desgaste) por superfícies de filme em nível molecular (ASM Handbook, 1992). A lubrificação limítrofe, comumente chamada de lubrificação de extrema pressão (EP), ocorre quando a temperatura e a pressão de carga são muito elevadas.

O λ , espessura do filme lubrificante, é um parâmetro que quantifica a probabilidade e a severidade das interações das asperezas durante o deslizamento lubrificado. Para $\lambda > 3$: um filme completo separa as duas superfícies, o contato entre as asperezas é desprezível e ambos, o atrito e o desgaste, seriam baixos – regime de lubrificação hidrodinâmico. Muitos contatos não-conformes operam com $1 < \lambda < 3$, no regime de lubrificação parcial ou mista, em que coexistem os regimes de lubrificação

limítrofe e elastohidrodinâmico, e podem ocorrer contato entre as asperezas (FARIAS, 2011).

A lubricidade do combustível é proporcionada pela quantidade de substâncias policíclicas aromáticas, poliaromáticas e cadeias orgânicas de oxigênio, enxofre e nitrogênio (SOUZA, 2010). O motor de ignição por compressão requer que o combustível tenha a função de lubrificação do sistema de alimentação de combustível (POSSIDONIO, 2008). Os elementos do óleo diesel responsáveis pelo aumento da lubricidade são os hidrocarbonetos e compostos de enxofre. O enxofre tem efeito nocivo sobre a estabilidade térmica, além de uma tendência de gerar corrosão metálica. Porém, a diminuição do teor de enxofre no diesel, abaixo de 50 mg/kg, por necessidades ambientais, decorreu na diminuição da sua propriedade lubrificante (SULEK et al., 2010).

A lubricidade do combustível diesel é uma grande preocupação, a partir do momento que se iniciou a diminuição do enxofre do diesel comercial, o que levou a diminuição da capacidade de lubricidade do combustível, levando a desgaste excessivos nos componentes do sistema de alimentação como injetores e bomba de combustível (MATTOS, 2012). Para contornar este problema foi adicionado ao diesel comercial uma porcentagem de biodiesel, aumentando em 65% a lubricidade do diesel (NICOLAU et al., 2014).

O objetivo de Mendes (MENDES, 2015) foi avaliar a lubricidade do biodiesel e sua relação com a vibração e a pressão sonora geradas pelo contato esfera-plano sob deslizamento alternado com os combustíveis diesel S50, éster metílico de soja e blendas B10 e B20. Utilizando parâmetros disponibilizados pela norma ASTM D6079 com tempos de ensaios de 75, 120 e 180 minutos, os resultados mostraram aumento da lubrificação em função do aumento do teor de biodiesel, todavia observou-se a diminuição da lubrificação com o aumento do número de ciclos aplicados. Conjuntamente, estabeleceu-se relação entre a vibração com a lubrificação, o teor de biodiesel, número de ciclos e parâmetros dos perfis das escaras das amostras.

3.4.2. Desgaste

O desgaste é o maior motivo de perdas de propriedades mecânicas dos componentes e sua redução tem grande influência no custo de manutenção, tornando-se a causa principal de perdas de energia por dissipação. A lubrificação é a maneira mais eficiente para controlar o desgaste e reduzir o atrito (STACHOWIAK, 2001), premissa indispensável em um motor de combustão interna. O desgaste ocorre devido a um processo mecânico que sucede com perda gradual do material (ASM Handbook, 2001), induzindo danos aos materiais, diminuindo eficiência, formando trincas e até fraturas.

Existem diversos mecanismos de desgaste, dentre eles o adesivo, item “a” da Figura 3.5, o mesmo possui muita instabilidade do coeficiente de atrito. Quando superfícies lisas entram em atrito com pressão, uma propende a aderir à outra, este fato ocorre devido à força de atração dos átomos da superfície que estão em contato. Logo após as superfícies estarem aderidas e continuarem a ser friccionadas, as rugosidades mudam, deixando desta forma a superfície desgastada (KATO, 2001).

Outra natureza do desgaste é desgaste abrasivo, item “b” da Figura 3.5, que ocorre em superfícies de diferentes durezas em contato entre si, sendo que neste desgaste ocorre a deposição do material de menor dureza na superfície do material de maior dureza. Para determinar uma proporção do desgaste deve ser avaliada as durezas dos materiais, a pressão e velocidade do contato (KATO, 2001). O desgaste dessa natureza pode ser dividido em quatro tipos: corte, fratura, fadiga e destacamento de grão.

O desgaste por fadiga, item “c” da Figura 3.5, acontece devido ao contato de superfícies que rolam ou deslizam, na qual a superfície contém falhas. Este desgaste acontece em decorrência de inúmeros contatos repetitivos das superfícies, que levam a região de contato a uma fratura por fadiga. De acordo com a teoria de Tensões de Hertz, na área que é pressionada e abaixo da superfície aparecem trincas que aumentam até a ruptura do material (NORTON, 2004).

O desgaste por corrosão, item “d” da Figura 3.5, ocorre pelo resultado de uma reação química por meio das interações entre os componentes envolvidos. Acontece uma reação tribo-química, que cria uma camada e esta é retirada pelo atrito, formando o desgaste. Frequentemente este tipo de desgaste acontece da interação entre o material e o lubrificante ou o meio. No desgaste por corrosão, pode acontecer a oxidação quando o responsável do desgaste é o oxigênio da atmosfera, neste caso chama-se de desgaste oxidativo (BATCHELOR, 2005).

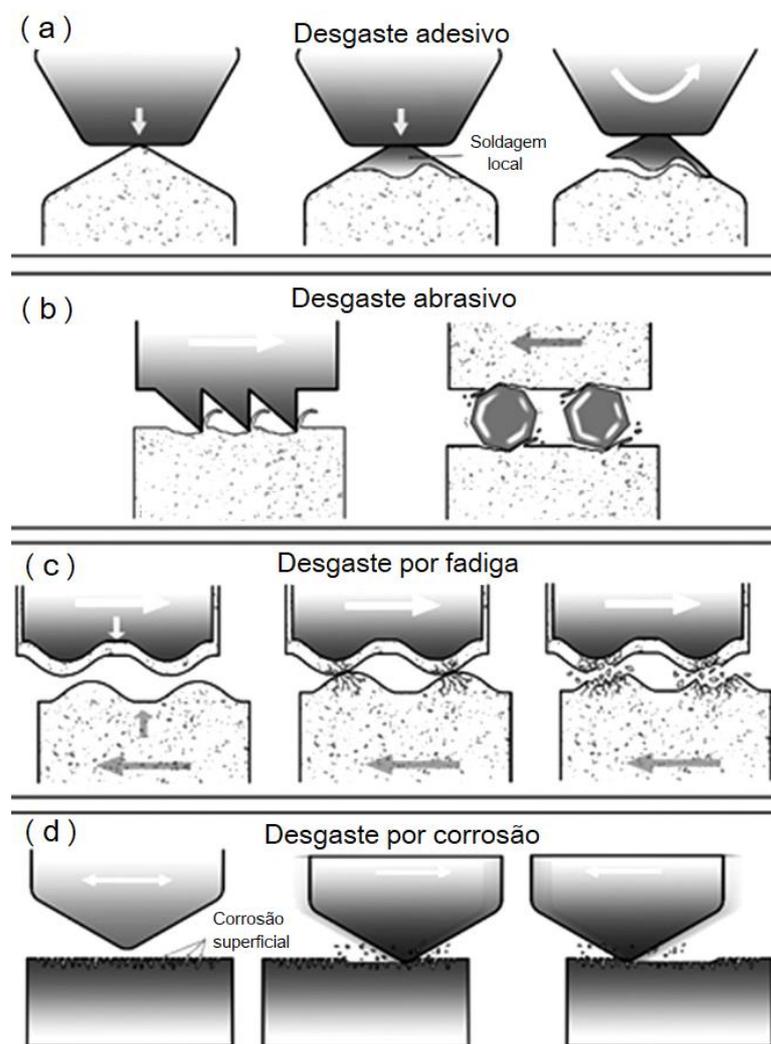


Figura 3.5. Descrição esquemática dos quatro principais mecanismos de desgaste (KATO, 2001).

No estudo desenvolvido por MARINHO (2014) foram monitorados parâmetros tribológicos e de desempenho em motores diesel bicomustível, onde se discorreu sobre parâmetros tribológico, de desempenho e os efeitos na aplicação em motores de locomotivas ferroviárias abastecidas com mistura de diesel e gás natural liquefeito nas razões de 70% de diesel e 30% gás natural liquefeito em comparação com outro motor idêntico abastecido apenas com diesel. Para isso, foram medidos os componentes mecânicos por meio de análises dimensionais, análise dos fenômenos físicos e métodos matemáticos e estatístico. Depois de 1050 horas de ensaio em plena carga, observou-se que os motores abastecidos com a blenda diesel/gás natural liquefeito obteve um desgaste menor que o previsto em literatura e em alguns componentes quando comparados com os motores que foram abastecidos apenas com diesel.

No estudo realizado por Garcia *et. al* (GARCÍA, 2021) foi avaliada a influência dos fatores de teste de desgaste, especificamente carga, distância e velocidade de deslizamento, na resposta do comportamento do desgaste como profundidade de desgaste e coeficiente de atrito. O ensaio foi realizado a seco no aço inoxidável ASTM 316L boretado de acordo com a norma ASTM G133-05 e mostrou que o fator de maior significância no desgaste foi a carga.

3.4.3. Atrito

O atrito é a resistência ao movimento entre duas superfícies em contato com movimento relativo, ou na iminência de movimento. Para o primeiro caso, o atrito é conhecido como atrito dinâmico e para o segundo, como atrito estático. O atrito estático é superior ao dinâmico.

O atrito estático é a força que impede que um corpo em repouso comece a se mover. É a força que mantém os objetos parados no lugar. O coeficiente de atrito estático (μ_s) é uma medida da força de atrito estático entre duas superfícies. Quanto maior o valor de μ_s , maior a força de atrito necessária para mover um objeto.

O atrito dinâmico é a força que atua sobre um corpo em movimento. É a força que impede que um corpo em movimento continue a se mover a uma velocidade constante. O coeficiente de atrito dinâmico (μ_d) é uma medida da força de atrito dinâmico entre duas superfícies. Quanto maior o valor de μ_d , maior a força de atrito necessária para manter um objeto em movimento.

Segundo HUTCHINGS (1992), a maior contribuição da força de atrito surge das interações mecânicas entre as deformações rígidas ou elásticas das asperezas. A Figura 3.6 representa o modelo de atrito geralmente denominado de modelo de Coulomb. Neste modelo, a ação das asperezas em forma de dentes de serra promove a separação das superfícies quando elas deslizam da posição A para a posição B, nesta fase do movimento o trabalho feito pela força de atrito contra a carga normal L . Na próxima fase do movimento, da posição B para a posição C, percebe-se que o modelo falha, uma vez que a carga normal realiza trabalho no sistema e toda energia potencial armazenada na primeira fase é recuperada (HUTCHINGS, 1992).

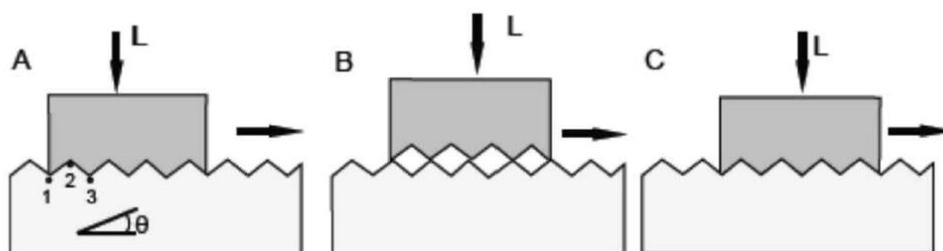


Figura 3.6. Representação do modelo de Coulomb para o atrito (STOETERAU, 2004).

3.4.4. Ensaios Tribológicos

Os ensaios tribológicos constituem em representar o processo de desgaste estudado no laboratório, sendo uma parte importante da investigação e desenvolvimento na tribologia, os estudos tribológicos são concebidos buscando ficar o mais próximo do modelo real. Logo, no arranjo dos ensaios é imprescindível acompanhar o desenvolvimento dos materiais aplicados nos sistemas desde seu conceito, seleção e aplicação. O tribo-sistema avaliado faz parte das propriedades tribológicas (LIMA, 2010).

Os ensaios tribológicos podem ser realizados usando diversas técnicas, incluindo ensaios de atrito e desgaste, ensaios de fadiga tribológica, ensaios de lubrificação e ensaios de erosão. Os resultados dos ensaios tribológicos são usados para avaliar as propriedades tribológicas de materiais, incluindo a taxa de desgaste, o coeficiente de atrito, a vida útil, a resistência à cavitação e a fadiga tribológica. Além disso, os ensaios tribológicos podem ser usados para otimizar o desempenho tribológico de sistemas mecânicos, selecionar materiais apropriados e avaliar o impacto da lubrificação no desempenho tribológico. Em resumo, os ensaios tribológicos são uma ferramenta importante na avaliação do desempenho tribológico de materiais e componentes mecânicos, fornecendo informações valiosas para a investigação e desenvolvimento na tribologia.

Existem diversos modelos de ensaios, dependendo do objetivo específico do teste e das condições de operação e todos tem o objetivo de realizar ensaios tribológicos simulando as condições reais do efeito do atrito. Além disso, é importante considerar as técnicas de medição e avaliação dos resultados dos ensaios tribológicos, que incluem a análise visual, a medição de rugosidade, a medição de espessura de película de lubrificante e a medição de força de atrito. Na Figura 3.7 é possível observar alguns tipos.

O equipamento designado para esta pesquisa foi o HFRR (*High Frequency Reciprocating Ring*) que consiste em uma técnica de ensaio tribológico que permite avaliar o desempenho de lubrificantes e superfícies de contato em condições de alta frequência e alta pressão. O equipamento possui um par tribológico, uma esfera (contra corpo) e um disco (corpo), sendo que a esfera desliza sobre o disco sob uma carga. Desta forma é possível obter o coeficiente de atrito e formação de filme lubrificante, quando realizado submerso em meio lubrificante.

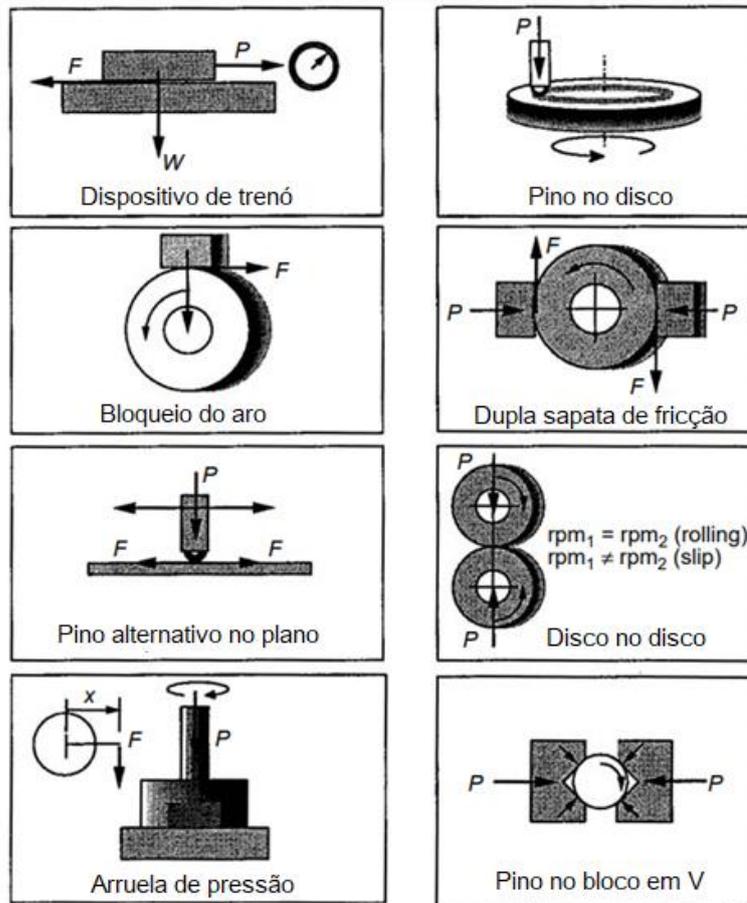


Figura 3.7. Representação dos diversos tipos de tribômetros e ensaios (BLAU, 2008).

De acordo com a Norma ISO 12156 (2006), com o método HFRR é possível verificar a formação de um filme lubrificante na região do regime de lubrificação limítrofe, apesar do baixo volume de lubrificante ensaiado. Além de ser possível avaliar o desgaste adesivo e fretting, com baixa velocidade de deslizamento. Os impactos da viscosidade e do calor gerados pelo atrito são reduzidos à baixa velocidade de deslizamento.

3.5. Planejamento ou Projeto de Experimentos (DOE)

A pesquisa científica é um processo de investigação sistemática que tem como objetivo gerar conhecimento novo ou confirmar conhecimento existente. A pesquisa científica pode ser realizada por meio de diferentes métodos, incluindo o desenho ou planejamento experimental.

O *Desing of Experiments* (DOE) é uma metodologia de pesquisa que permite aos pesquisadores controlar as variáveis envolvidas em um estudo e, assim, obter conclusões mais confiáveis. O planejamento experimental é uma ferramenta importante para a pesquisa científica, pois pode ser usado para testar hipóteses, comparar tratamentos ou avaliar o impacto de fatores ambientais.

O DOE pode ser definido como um conjunto de procedimentos que permitem aos pesquisadores controlar as variáveis envolvidas em um estudo. O objetivo do desenho experimental é garantir que as diferenças observadas nos resultados de um estudo sejam causadas pela variável de interesse e não por outras variáveis.

As variáveis envolvidas em um estudo experimental podem ser divididas em duas categorias: variáveis independentes e variáveis dependentes. As variáveis independentes são as variáveis que o pesquisador manipula, e as variáveis dependentes são as variáveis que o pesquisador observa (MONTGOMERY, 2013).

O planejamento experimental é baseado em alguns princípios básicos, podendo-se destacar:

- Controle das variáveis: as variáveis que podem influenciar os resultados do estudo devem ser controladas, exceto a variável de interesse;
- Randomização: os participantes do estudo devem ser distribuídos aleatoriamente pelos grupos experimentais;
- Repetição: o experimento deve ser repetido várias vezes para aumentar a confiabilidade dos resultados.

O desenho experimental é uma ferramenta importante para a pesquisa científica, pois pode ser usado para:

- Testar hipóteses: permite aos pesquisadores testar hipóteses sobre a relação entre variáveis;
- Comparar tratamentos: pode ser usado para comparar dois ou mais tratamentos para determinar qual é o mais eficaz;

- Avaliar o impacto de fatores ambientais: pode ser usado para avaliar o impacto de fatores ambientais, como poluição ou mudanças climáticas.

Para o DOE ser empregado, é necessário seguir cinco etapas principais, a saber:

- A primeira etapa é a definição do problema que o DOE será utilizado para resolver.
- A segunda etapa consiste em identificar os fatores que podem afetar a resposta e definir a resposta que será medida. Os fatores são as variáveis que podem ser controladas ou manipuladas pelo pesquisador. A resposta é a variável que o pesquisador está tentando medir. Logo após é necessário selecionar o tipo de DOE. Existem diversos tipos de DOE, alguns dos tipos mais comuns de DOE incluem. Planejamento fatorial: O planejamento fatorial é um tipo de DOE que permite aos pesquisadores estudar o efeito de vários fatores simultaneamente. Experimentos de resposta à superfície: Os experimentos de resposta à superfície permitem aos pesquisadores estudar o efeito de vários fatores em uma resposta contínua. Experimentos de design robusto: que permitem aos pesquisadores identificar os fatores que afetam a variabilidade da resposta.
- A terceira etapa é desenvolver um plano experimental que irá variar os fatores de interesse e registrar os resultados. O plano experimental deve ser projetado para garantir que todos os efeitos dos fatores possam ser identificados, como: número de fatores, níveis de fatores e ordem do experimento. Existem diversos métodos para criação de matrizes de experimento no DOE, os mais comuns são: planejamento fatorial completo, planejamento fatorial fracionado, matriz ortogonal e matriz de Taguchi (KUEHL, 1994).
- A quarta etapa é a execução do experimento, conforme o plano experimental.
- A quinta etapa é a realização da análise dos dados do experimento, para identificar os fatores que tem mais impacto na resposta. A análise pode ser feita por diversos métodos estatísticos, os mais utilizados são regressão linear, análise de superfície de resposta e análise de variância (MONTGOMERY, 2013).

4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste capítulo é apresentada a metodologia experimental aplicada no desenvolvimento do trabalho, a qual é demonstrada de forma resumida no fluxograma da Figura 4.1. Todos os procedimentos experimentais foram desenvolvidos nos laboratórios da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS), utilizando-se de métodos e técnicas de ensaios seguindo suas respectivas normas técnicas.

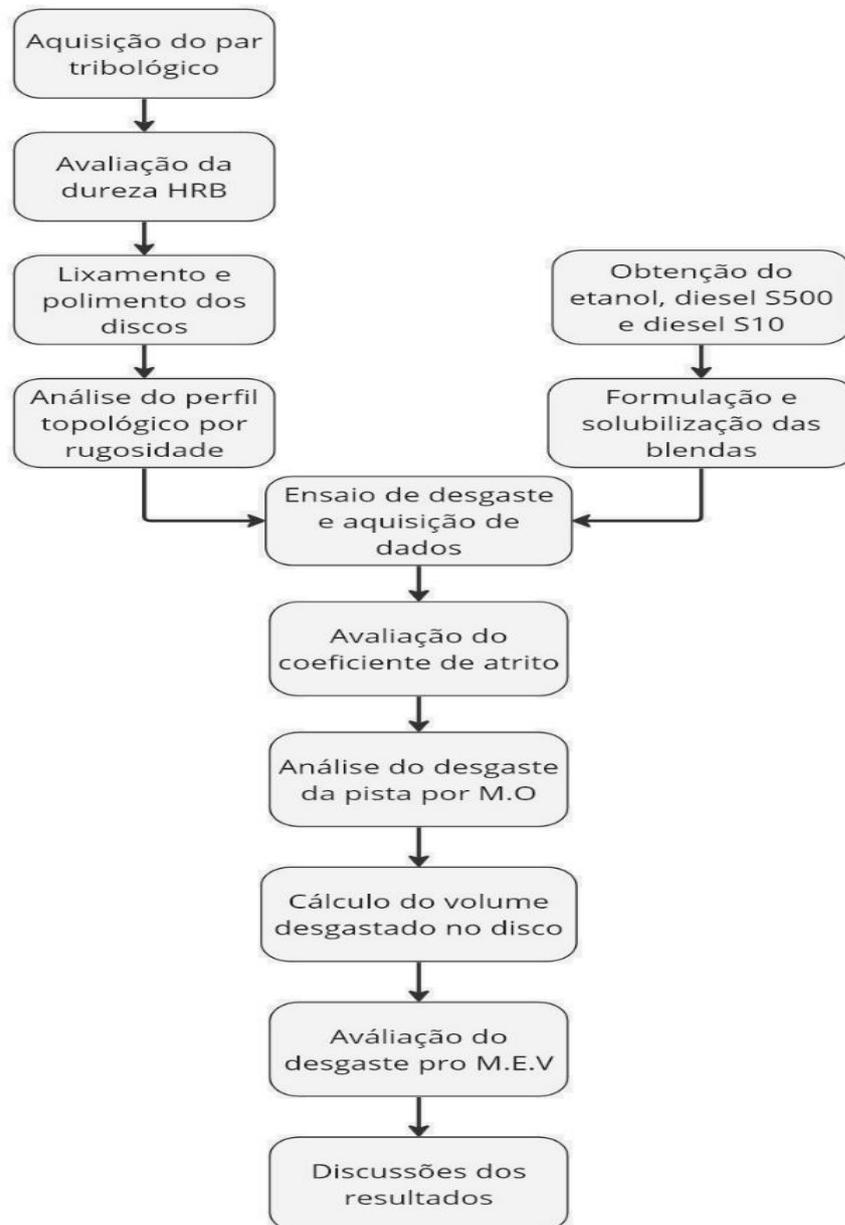


Figura 4.1. Fluxograma resumido da metodologia utilizada.

4.1. Amostras do Aço-cromo ASTM 52100

O material selecionado para as análises tribológicas foi o aço ASTM 52100, na forma de discos com diâmetro de 10 mm e espessura de 3 mm, adquirido junto ao fornecedor do equipamento tribômetro, empresa *DUCOM Instruments* (Índia). Segundo classificação da norma ASTM A 295 - *Standard Specification for High-Carbon Anti-Friction Bearing Steel* (ASTM A 295, 1998), o aço ASTM 52100 apresenta em sua composição química nominal os seguintes elementos e concentrações: Carbono entre 0,93-1,05%; Cromo entre 1,35-1,60; Manganês entre 0,25-0,45%; Silício entre 0,15-0,35%; Níquel (máx.): 0,25; Cobre (máx.): 0,30; Molibdênio (máx.): 0,10; Fósforo (máx.): 0,025 e Enxofre (máx.): 0,015.

4.1.1. Análise Microestrutural

Para conhecimento da microestrutura do aço, foi realizada a análise metalográfica de uma amostra do material seguindo a norma ASTM E 3 (ASTM E 3, 2001). A amostra teve sua superfície preparada utilizando lixas #320, #400, #600, #1200 e o procedimento foi concluído com o polimento da superfície, utilizando-se solução de alumina 1 μm e 0,3 μm . A microestrutura foi revelada por ataque químico com o reagente Nital 5% por 3 segundos. Na sequência, a microestrutura foi analisada por microscopia óptica (MO), sendo o microscópio empregado da marca Olympus, Modelo PMG3, acoplado a um microcomputador, um monitor LCD e uma câmera digital com resolução de 4 MP. Foi utilizado o software *TCapture* para aquisição e tratamento das imagens metalográficas.

4.1.2. Medidas de Dureza

Para as medidas de dureza foi selecionado o método Rockwell, realizado em um durômetro analógico da marca WKE. Foram testadas as escalas Rockwell C (pré-carga 10 kgf, carga total 150 kgf, penetrador de diamante esfero-cônico de 120°) e Rockwell B (pré-carga 10 kgf, carga total 100 kgf, penetrador de aço endurecido com diâmetro de 1/16" – 1,59 mm), e devido aos valores obtidos, os resultados válidos

enquadraram-se na escala B. Todos os procedimentos foram realizados de acordo com a norma ASTM E 18 (ASTM E 18, 2022), e ao total foram realizadas seis medidas na seção transversal, sendo apresentados os valores médios e os desvios observados.

4.1.3. Análise da Rugosidade Superficial

Para a realização das medidas de rugosidade superficial das amostras, foi utilizado um rugosímetro portátil SurfTest SJ-210 (Figura 4.2), marca Mitutoyo, que possibilita a obtenção de vários parâmetros, dos quais o parâmetro R_a foi utilizado (R_a - rugosidade média do termo em inglês *roughness average*). Todos os testes foram realizados seguindo a norma NBR ISO 4287 (NBR ISSO 4287, 2017), e para tanto foi confeccionado dispositivo porta-amostra em impressora 3D para fixação dos discos.



Figura 4.2. Rugosímetro portátil SurfTest SJ-210 e amostra posicionada no dispositivo de fixação.

4.2. Preparação do Par Tribológico

Os materiais utilizados na análise tribológica são compostos pelo disco plano (corpo) do aço ASTM 52100 e pela esfera de alumina (contra-corpo), sendo as dimensões apresentadas na Figura 4.3.

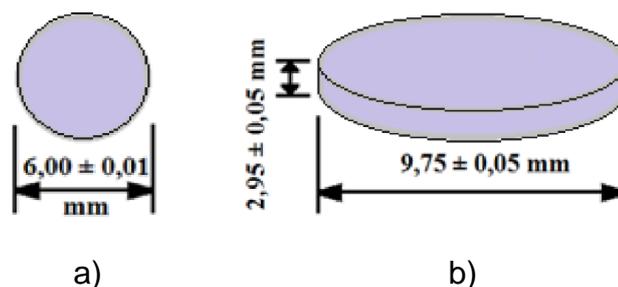


Figura 4.3. Dimensões do par esfera-disco: esfera de alumina e disco de aço ASTM 52100.

Os discos foram preparados de modo que sua superfície apresentasse uma rugosidade média (R_a) de $0,05 \mu\text{m}$. Para isso, foram utilizadas diversas granulometrias de lixas #320, #400, #600, #1200 e concluindo com polimento aplicando solução de alumina $1 \mu\text{m}$ e $0,3 \mu\text{m}$. Logo após, as amostras repousaram durante doze horas em um recipiente com álcool e, após este período, foram submetidas a banho por ultrassom de 7 min., mergulhadas em um béquer com álcool etílico 95% e, na sequência, novamente submetidos a outro banho por ultrassom, agora de 2 min., com acetona para a remoção do resíduo do álcool. Finalizado o banho, foram secas com soprador térmico e guardadas em um dessecador até os testes no tribômetro.

4.3. Aquisição e Concepção das Blendas

Foram utilizados os combustíveis diesel S500 e S10 (ambos adquiridos no Posto de Combustíveis Alicar Ltda, localizado em Porto Alegre-RS) e do combustível etanol (adquirido no Posto Carrefour Comércio e Indústria Ltda, localizado em Porto Alegre-RS).

Os combustíveis diesel S500 e S10, ambos com teor de 10% de biodiesel, foram preparados no Laboratório de Materiais (LAMAT) da PUCRS com adição de etanol nas proporções volumétricas de 2%, 4,5% e 7% (v/v), a temperatura ambiente, em frascos de vidro de cor âmbar, agitado manualmente por 5 min, método repetido para todas as blendas. Um total de seis blendas de combustíveis diferentes foram utilizadas, os quais são identificadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Identificação das blendas dos combustíveis.

Blendas	Descrição
JS502	98% de diesel S500 + 2% de etanol
JS545	95,5% de diesel S500 + 4,5% de etanol
JS507	93% de diesel S500 + 7% de etanol
JS102	98% de diesel S10 + 2% de etanol
JS145	95,5% de diesel S10 + 4,5% de etanol
JS107	93% de diesel S10 + 7% de etanol

4.4. Ensaio Tribológicos

Os ensaios tribológicos foram realizados no tribômetro *High Frequency Reciprocating Test* (HFRR), fabricado pela *Ducom Instruments*, modelo HFRR 4.2 (Figura 4.4). Trata-se de um dispositivo desenvolvido para ensaios recíprocos que utiliza uma esfera e um disco como elementos do par de desgaste.

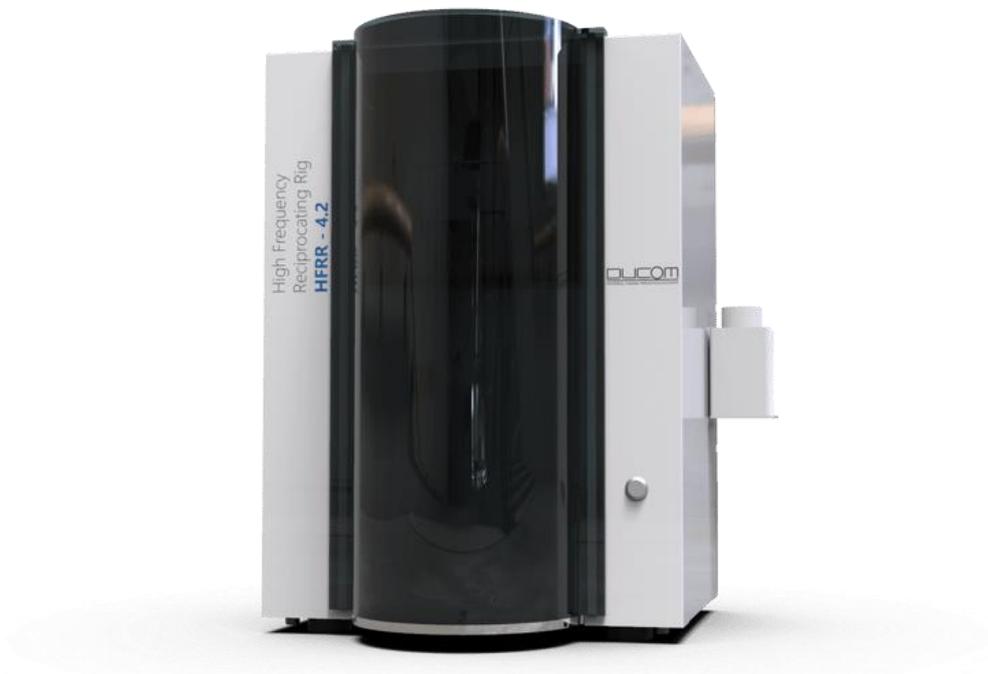


Figura 4.4. Tribômetro do tipo *High Frequency Reciprocating Rig* (HFRR 4.2).

O equipamento possibilita que parâmetros de testes tais como temperatura, frequência, amplitude, carga, humidade e material dos corpos-de-prova possam ser modificados de modo que uma determinada variável de ensaio possa ser explorada. Este equipamento possibilita medir a força de atrito entre o par tribológico, e desta forma, determinar o coeficiente de atrito dinâmico durante todo o ensaio. A Tabela 4.2 informa as características principais do equipamento.

Tabela 4.2. Características e faixas de operação do tribômetro HFRR 4.2.

Especificações técnicas do equipamento	
Frequência	10 a 50 Hz
Curso (amplitude)	1,0 mm
Carga Normal	100 a 1000 g
Temperatura	Ambiente até 95 °C
Tensão	240 VCA
Esfera (superior)	6,0 mm de diâmetro
Disco (inferior)	10,0 mm de diâmetro x 3 mm de espessura

Associado ao equipamento está um computador, que realiza o gerenciamento da análise e coleta as variáveis monitoradas (temperatura, força de atrito, coeficiente de atrito e humidade). O equipamento dispõe de um porta-disco confeccionado em alumínio, com recipiente que comporta 2ml de fluido para realização de ensaios com disco submerso. A esfera é fixada em seu suporte utilizando-se um parafuso para impedir movimentos orbitais, e o disco é fixado no porta-amostra utilizando-se dois parafusos opostos, em relação ao diâmetro do disco. A Figura 4.5 mostra uma fotografia dos suportes da esfera e do disco.



Figura 4.5. Suporte da esfera (a esquerda) e porta-amostra do disco com recipiente para ensaio com lubrificante (a direita).

4.5. Matriz de Experimentos

Através do software Origin ProLab 2022® e seu aplicativo *Design of Experiments* (DOE), foi projetada a matriz dos experimentos com a entrada das variáveis (input) para os ensaios: porcentagem de etanol, carga aplicada, distância percorrida e tipo de diesel. O percentual de etanol (2%; 4,5%; e 7%) e o tipo de diesel (S500 e S10) foram considerados variáveis “categóricas”, ou seja, sem alterações nos valores, enquanto a carga (200g, 500g e 800g) e a distância percorrida (100m, 300m e 500m) foram consideradas “contínuas”. Como variáveis de resposta (output) foram selecionados o coeficiente de atrito e o volume desgastado. Foi utilizado o método Box-Benhken para construção da matriz, com randomização dos experimentos. Assim, é possível ajustar um modelo aos dados experimentais e encontrar as melhores configurações para que as respostas sejam aprimoradas. O DOE indica a configuração inicial otimizada, demonstrada na Tabela 4.3, onde observa-se a proposta da realização de 32 ensaios.

Analisando a Tabela 4.3, observam-se valores intermediários entre os limites mínimos e máximos estabelecidos para as variáveis carga e distância percorrida em função de metodologia empregada pelo método estatístico associado ao Box-Benhken. Como o objetivo da investigação é analisar a influência de diferentes blendas no comportamento ao desgaste do aço ASTM 52100, nenhuma condição à seco foi analisada pois se afasta do escopo do presente trabalho.

Tabela 4.3. Matriz de experimentos.

Arranjo	% de Etanol	Carga (g)	Distância (m)	Diesel
1	2	200	300	10
2	2	500	100	10
3	2	500	500	10
4	2	800	300	10
5	4,5	200	500	10
6	4,5	200	100	10
7	4,5	500	300	10
8	4,5	500	300	10
9	4,5	500	300	10
10	4,5	500	300	10
11	4,5	800	100	10
12	4,5	800	500	10
13	7	200	300	10
14	7	500	500	10
15	7	500	100	10
16	7	800	300	10
17	2	200	300	500
18	2	500	100	500
19	2	500	500	500
20	2	800	300	500
21	4,5	200	500	500
22	4,5	200	100	500
23	4,5	500	300	500
24	4,5	500	300	500
25	4,5	500	300	500
26	4,5	500	300	500
27	4,5	800	500	500
28	4,5	800	100	500
29	7	200	300	500
30	7	500	500	500
31	7	500	100	500
32	7	800	300	500

4.6. Medidas da Pista de Desgaste e Determinação do Volume Desgastado

A pista desgastada no corpo de prova (disco) necessita ser medida para que se estime o volume do desgaste e, dada a dimensão microscópica deste desgaste, faz-se necessário a utilização de um microscópio óptico para esta análise.

$$V = V_{calota} + V_{trilha} \quad (4.1)$$

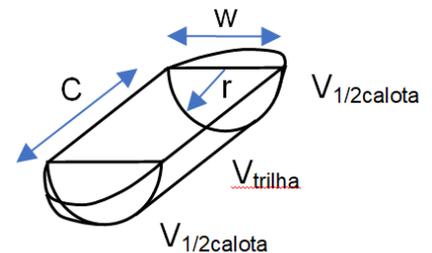
$$V = \frac{\pi.D^4}{64.r} + \left\{ \left[r^2 \cdot \text{sen}^{-1} \left(\frac{w}{2.r} \right) \right] - \left[\frac{w}{4} \cdot \sqrt{4.r^2 - w^2} \right] \right\} \cdot C \quad (4.2)$$

onde: D = diâmetro da esfera (mm);

r = raio da esfera (mm);

w = largura da trilha (mm);

C = comprimento da trilha (mm).



De acordo com a norma ASTM D 7755, intitulada "Prática Padrão para Determinar o Volume de Desgaste em Peças de Teste Padrão Usadas por Máquina de Teste de Oscilação Linear de Alta Frequência" (ASTM D 7755, 2011), utiliza-se as Equações (4.1) e (4.2) para determinar o volume desgastado (V) quando se considera a configuração da pista de desgaste conforme esquema a seguir.

Para auxiliar os cálculos dos volumes desgastados, foi concebido dentro do LAMAT um programa com base na linguagem Python (Figura 4.6), onde a partir da área de um pixel, obtém-se por comparação da imagem gerada pelo software TCapture a identificação da área desgastada (demonstrada na Figura 4.7), e informando a geometria desta área, o software calcula o volume desgastado da amostra. O aplicativo realizada a aquisição da imagem capturada em microscópio óptico, analisa os pixels e define a área desgastada por contraste de coloração da imagem. De acordo com o formato da pista desgastada (esférica, elipsóide ou cilíndrica), seleciona-se a opção para que as equações de volume sejam utilizadas.

Para o trabalho, os volumes de desgaste foram calculados manualmente e com o auxílio de uma calculadora de desgastes, sendo os resultados concordantes.

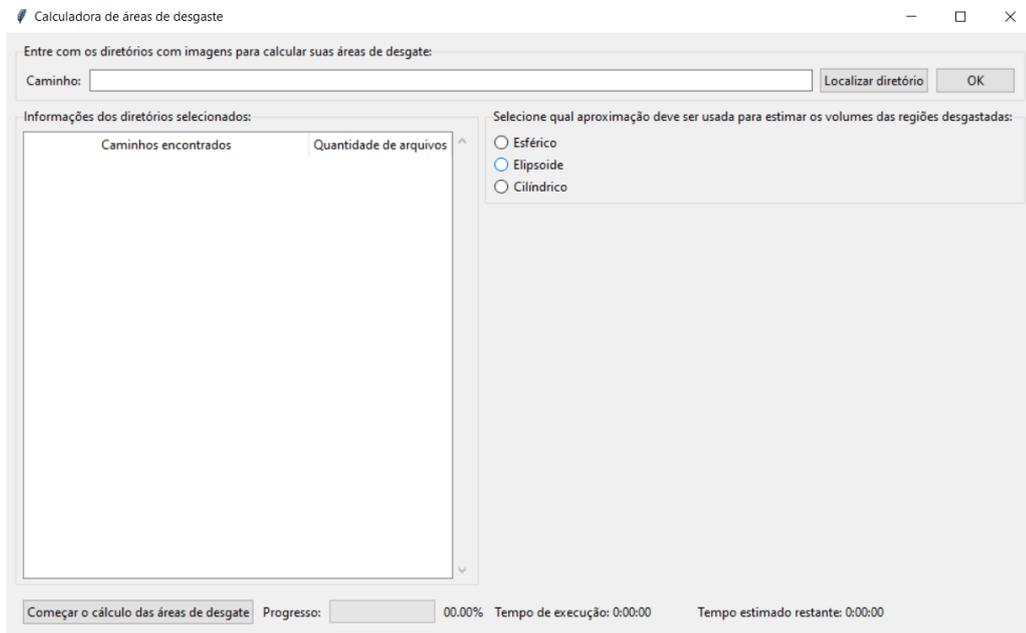


Figura 4.6. Interface inicial da calculadora de volume desgastado.

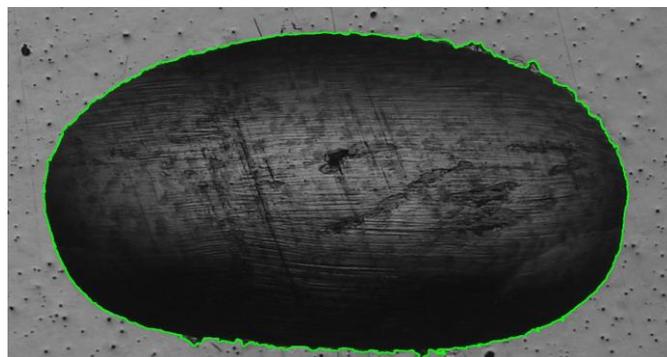


Figura 4.7. Imagem exemplo da seleção da área desgastada, realizada pela calculadora.

Por fim, as pistas de desgaste das amostras foram analisadas em microscópio eletrônico de varredura (MEV, modelo F50, marca Inspect, do Laboratório de Microscopia e Microanálises da PUCRS), nos modos SE (elétrons secundários) e BSE (elétrons retroespalhados) com a finalidade de identificar os micromecanismos de desgaste das pistas de desgaste.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios realizados, sendo que os mesmos seguem a sequência cronológica de execução conforme apresentado no Capítulo 4 do procedimento experimental.

5.1. Microestrutura, Dureza e Rugosidade Superficial

A microestrutura revelada do aço ASTM 52100 pode ser vista na Figura 5.1. Na imagem é possível observar na porção mais clara, a fase ferrita (formando a matriz), e na porção mais escura, os carbonetos esferoidizados dispersos na matriz, entre eles a cementita (Fe_3C) e carbonetos de cromo (Cr_xC_y). Deste modo é possível confirmar que a amostra passou por tratamento térmico de esferoidização, visando alterar a distribuição dos carbonetos na microestrutura que se distribuem em forma de glóbulos dispersos na matriz, permitindo obter a máxima ductilidade para este aço (MIER, 2014), que apresenta alto teores de C e Cr, entre 0,93-1,05% e 1,35-1,60%, respectivamente.

O valor médio obtido nas medidas de dureza foi de 98 ± 1 HRB. Uma vez que o material se encontra na condição esferoidizado, é de se esperar uma dureza baixa, conforme sugerido pela norma ASTM A 295 com máxima dureza de 92 HRB para barras e tubos (ASTM A 295, 1998).

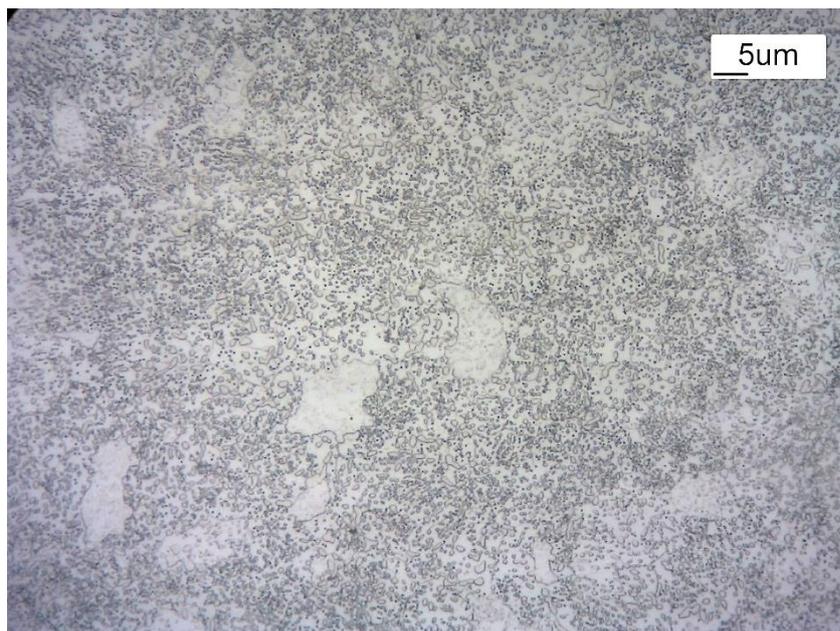


Figura 5.1. Microestrutura do aço ASTM 52100, matriz ferrítica (porção clara) e carbonetos esferoidizados (porção escura).

As análises de rugosidade foram realizadas nas superfícies dos discos antes dos ensaios de desgaste. Um exemplo do perfil obtido é apresentado na Figura 5.2, com valor $R_a = 0,247 \mu\text{m}$ e $R_z = 1,154 \mu\text{m}$, demonstrando no eixo vertical a altura do perfil da superfície e no eixo horizontal o deslocamento do instrumento de medição em mm.

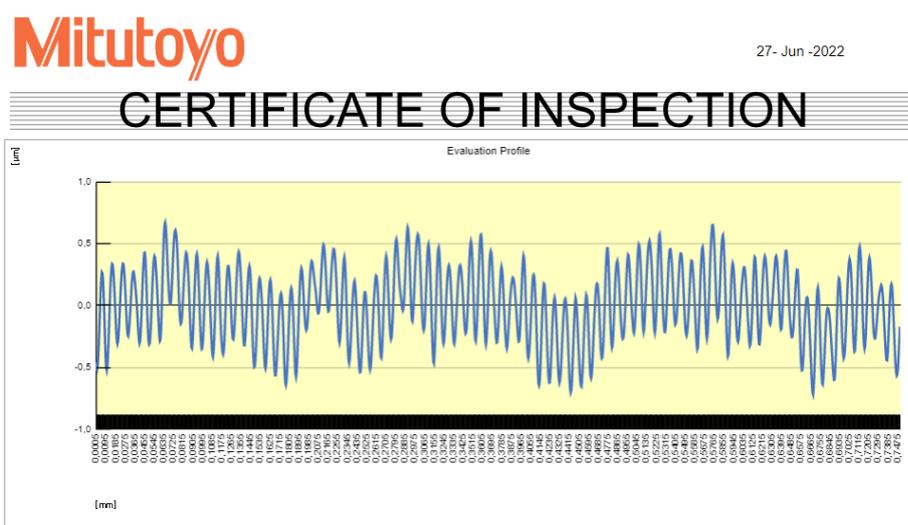


Figura 5.2. Perfil de rugosidade da superfície do disco de aço ASTM 52100.

5.2. Coeficientes de Atrito Dinâmico

Como a morfologia da superfície desgastada se modifica de acordo com o tipo de combustível utilizado, o Coeficiente de Atrito Dinâmico (COF) se configura como uma ferramenta para avaliar o comportamento tribológico de combustíveis (SILVESTRE, 2017). Utilizando a blenda diesel S10 com 2% de etanol sob as condições definidas pelo DOE, os gráficos de COF em função da distância percorrida podem ser visualizados na Figura 5.3. As avaliações foram realizadas em quatro condições distintas; 5.3a.) carga de 200g com distância de 300m, 5.3b e c.) carga de 500g com distâncias de 100m e 500m, e 5.3d.) carga de 800g e distância de 300m. O processo de geração de atrito está diretamente relacionado à morfologia da superfície, principalmente às irregularidades presentes na zona da escara de desgaste.

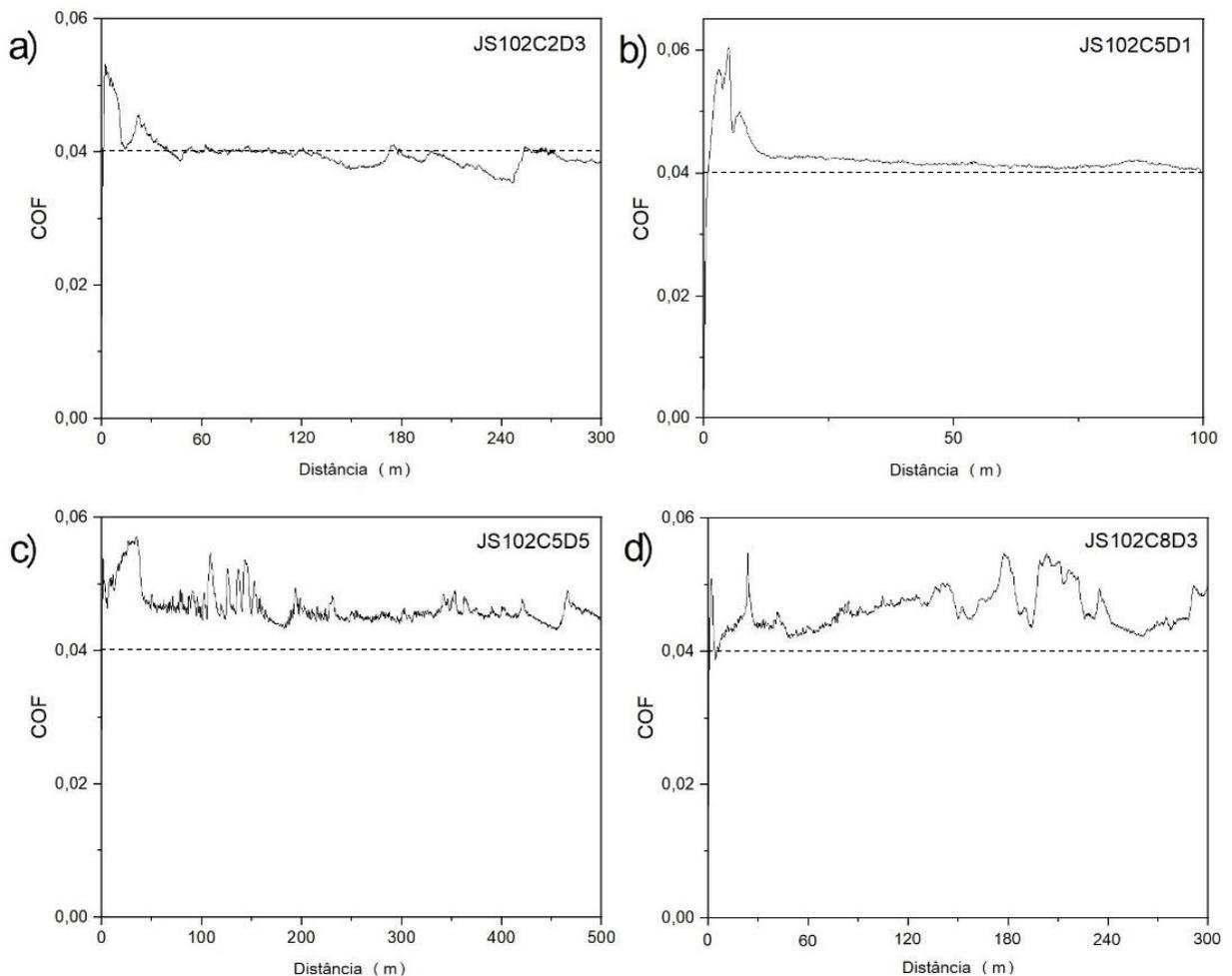


Figura 5.3. Coeficientes de atrito para a blenda JS102 (S10 - 2% de etanol) com carga e distância de: a) 200g e 300m, b) 500g e 100m, c) 500g e 500m, e d) 800g e 300m.

Observa-se para a carga de 200 g (Figura 5.3a), que o valor inicial do COF apresenta um aumento exponencial até a distância de 10 m, mostrando valores próximos a 0,54. Este comportamento refere-se ao regime transiente inicial, que pode ser atribuído a interação entre o corpo de desgaste e as irregularidades superficiais do contra corpo, as quais agem como resistência ao movimento deslizante. Com a quebra das saliências da superfície, o COF diminui rapidamente para valores em torno de 0,4. A partir da distância de 60m (fim do regime transiente), o valor do COF torna-se estável, conhecido como regime estacionário. Comportamento similar e mais estável foi observado para a carga de 500g e distância de 100m (Figura 5.3b), sendo o valor médio de COF no regime estacionário em torno de $0,4 \pm 0,2$ para ambas as condições. Porém, para as cargas de 500g e 800g e distância maiores que 500m e 300m, respectivamente (Figuras 5.3c e 5.3d), os comportamentos apresentaram-se instáveis durante todo o ensaio, com grandes variações no COF ao longo das distâncias de ensaio. Nestes casos, os valores médios de COF ficaram entre 0,45 e 0,55, com maiores variações para a condição com maior carga, de 800g.

Com a adição de 4,5% de etanol ao diesel S10, foi avaliada a carga de 500g com distância de 300m (em quaduplicada, Figura 5.4), e as cargas de 200g com distância de 100m e 500m (Figuras 5.5a e 5.5b), e carga de 800g em distância de 100m e 500m (Figuras 5.5c e 5.5d). Na Figura 5.4, onde são apresentados os resultados obtidos para a blenda JS145 com carga de 500g e distância de 300m, ensaios em quaduplicata, observa-se que os ensaios 1 e 3 apresentaram comportamentos similares, com alguma variação durante o regime estacionário e valores de COF médio de 0,45. Para as replicatas 2 e 4, novamente observou-se variações durante os ensaios no regime de comportamento estacionário, porém com valores médios próximos a 0,4. De uma forma geral, observou-se reprodutibilidade dos resultados, com certa variação inerente ao processo de desgaste em um sistema tribológico. É importante comparar estes resultados com os obtidos na blenda com 2% de etanol adicionado, onde nota-se uma diminuição nos valores de COF com o aumento na adição do teor do etanol.

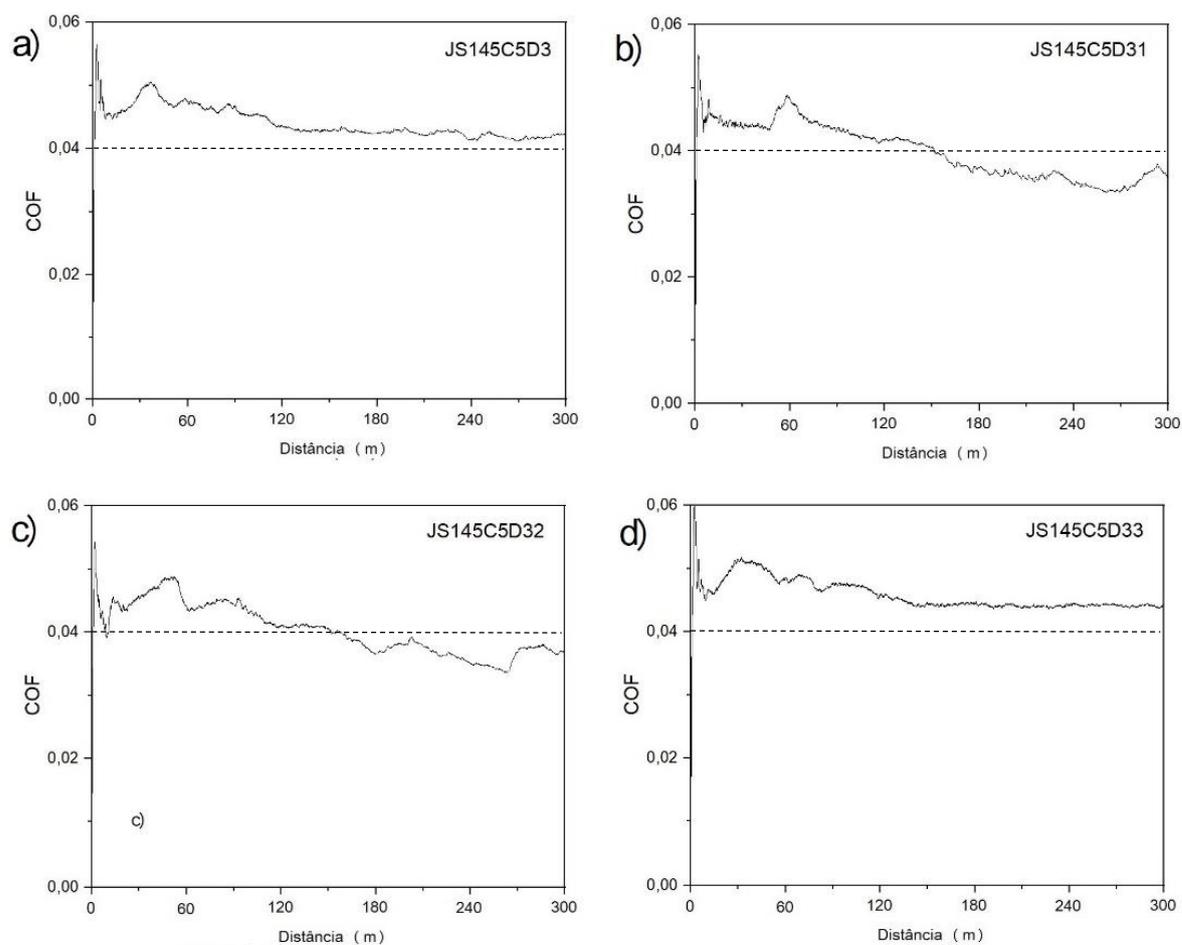


Figura 5.4. Coeficiente de atrito para a blenda JS145 (S10 – 4,5% de etanol) com carga de 500g e distância de 300m – ensaios em quadruplicata.

As curvas das Figuras 5.5a a 5.5c com as cargas de 200g e 800g e distâncias de 100m e 500m, respectivamente, evidenciam regime transitório até 30 m, caracterizado pelo aumento instantâneo do COF até valores de 0,57. A partir desta distância, os comportamentos se mantêm similares, independentemente da carga aplicada e distância percorrida, com valores médios de COF de 0,4. Porém, observa-se a estabilização do COF abaixo de 0,3 a partir de 250m percorridos para a condição de maior carga e distância percorrida (800g e 500m).

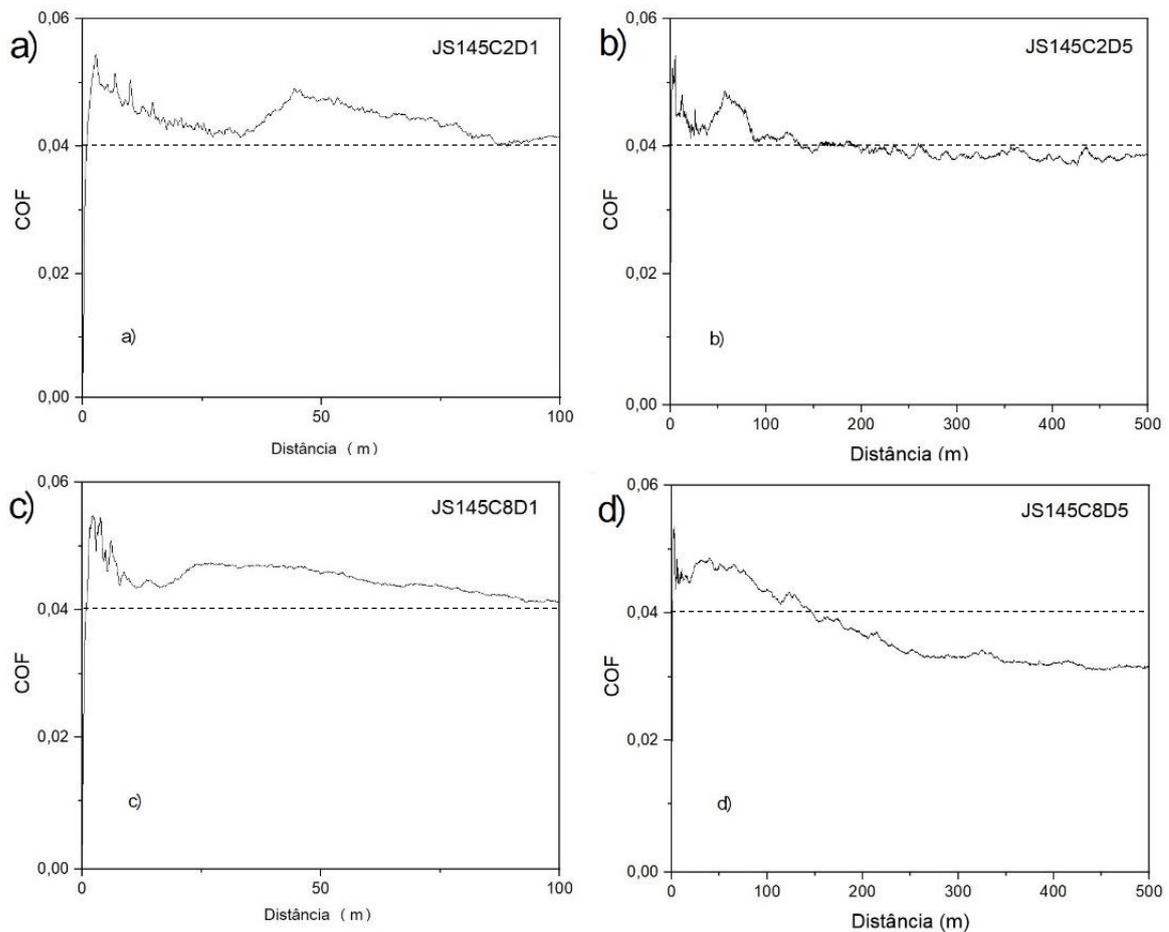


Figura 5.5. Coeficiente de atrito para a blenda JS145 (S10 – 4,5% de etanol) com carga e distância de: a) 200g e 100m, b) 200g e 500m, c) 800g e 100m e d) 800g e 500m.

Ao adicionar 7% de etanol ao diesel S10, as avaliações do COF foram realizadas para as seguintes condições: 200g com distância de 300m (Figura 5.6a), carga de 500g com distância de 100m e 300m (Figuras 5.6b e 5.6c), e carga de 800g em distância de 300m (Figura 5.6d). Conforme gráficos do COF em função distância apresentados na Figura 5.6, no regime transiente inicial, observa-se um acréscimo no valor do COF para valores próximos a 0,6 em todas as configurações com esta blenda para distância percorridas até 25 m, exceto para a carga de 200g e distância percorrida de 300m. Posteriormente, no regime estacionário, verifica-se uma instabilidade do COF para todas as condições de carga. Com as cargas de 500g e 800g e distâncias de 300m e 500m, nota-se uma diminuição significativa do COF a partir de 150 m, obtendo-se valores próximos de 0,3 para distância a partir de 250 m para ambas as condições.

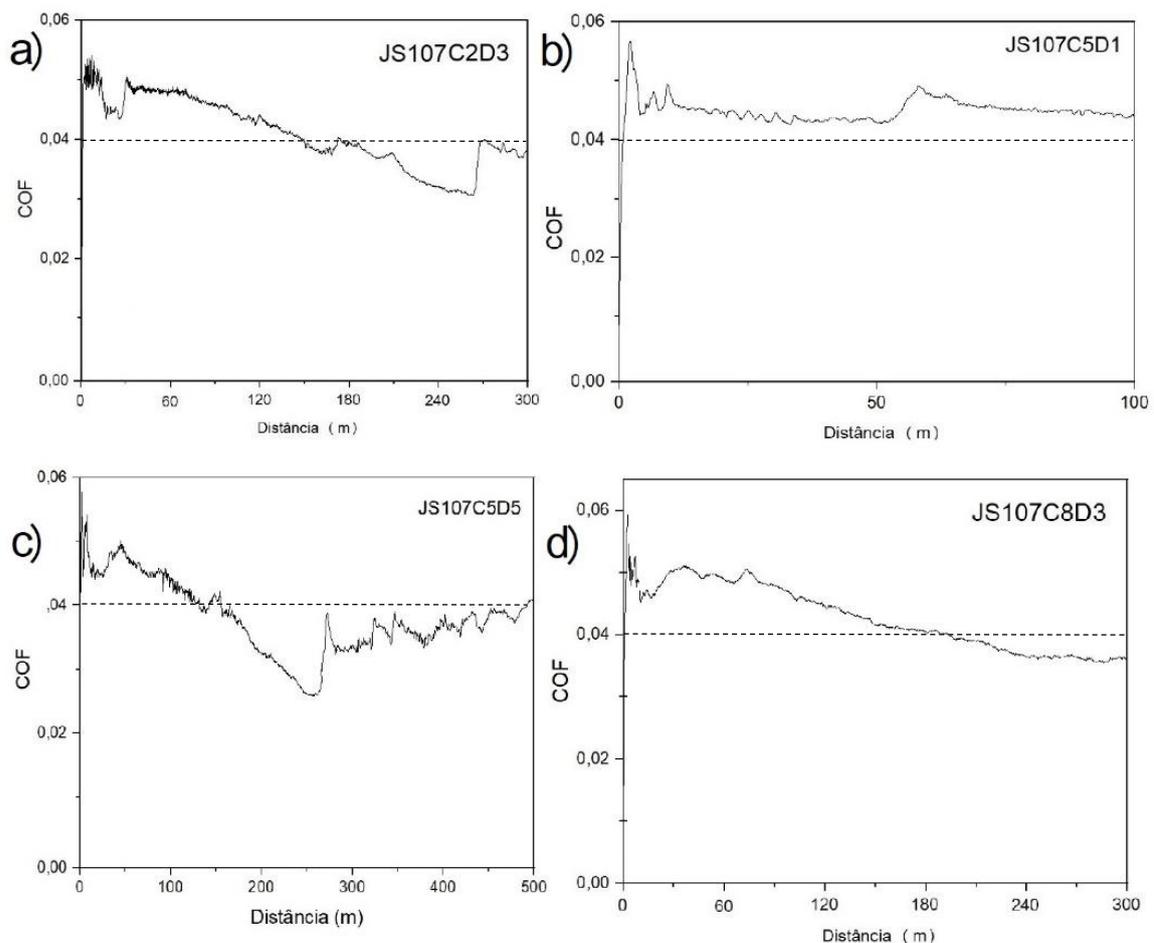


Figura 5.6. Coeficiente de atrito para a blenda JS107 (S10 – 7% de etanol) com carga e distância de: a) 200g e 300m, b) 500g e 100m, c) 500g e 500m e d) 800g e 300m.

Para o diesel S10, observa-se que a adição de etanol induziu a uma diminuição no COF, independente da carga e da distância aplicadas. Quando analisadas as condições isoladas, nota-se que para maiores cargas e distâncias percorridas os valores de COF foram menores para o teor de 7% de etanol adicionado, seguido de 4,5% e 2%. Isto indica que apesar das maiores forças normais do sistema tribológico, as condições de atrito diminuem com a adição de etanol na blenda, sugerindo uma melhora na lubrificidade do combustível diesel S10 com o aumento do teor de etanol.

A Figura 5.7 apresenta a visualização gráfica do COF para o diesel S500 com 2% de etanol, sob as condições estabelecidas pelo DOE. Foram realizadas análises nas seguintes condições: carga de 200g com distância de 300m (Figura 5.7a), carga

de 500g com distância de 100m e 500m (Figuras 5.7b e 5.7c) e carga de 800g e distância de 300m (Figura 5.7d). A análise dos resultados do COF nas condições testadas revelou a presença clara dos regimes transiente e estacionário. Em todos os casos, o valor do COF apresentou baixa instabilidade. Dentre as condições testadas, destaca-se as respostas no regime transiente inicial, onde os ensaios com 200g e 500g mostrou valores de COF próximos a 0,057, enquanto a carga de 800g apresentou valores máximos de 0,078. Exceção foi observada para a condição com 500 g de carga e 100 m de distância. Essa condição apresentou o menor valor médio de COF, tanto no estágio inicial (com valor de 0,028) como no regime estacionário (0,22), sendo este comportamento muito discrepante quando comparado aos outros. Como principal diferença com os resultados do diesel S10, nota-se que os valores de COF apresentam uma ordem de grandeza abaixo dos verificados anteriormente.

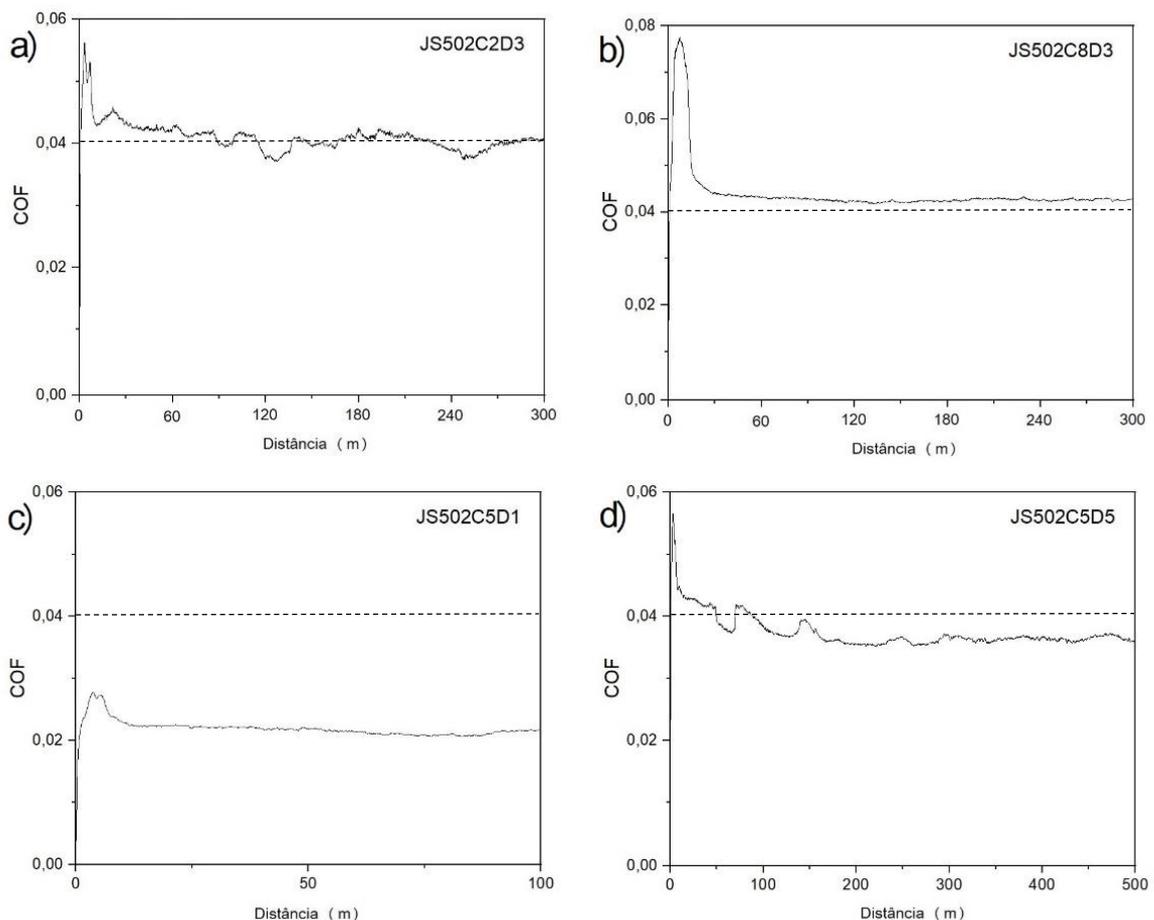


Figura 5.7. Coeficiente de atrito para a blenda JS502 (S500 – 2% de etanol) com carga e distância de: a) 200g e 300m, b) 500g e 100m, c) 500g e 500m, d) 800g e 300m.

Análise da influência da adição de 4,5% de etanol ao diesel S500, foram avaliadas com as condições de carga de 200g com distância de 100m e 500m (Figuras 5.8a e 5.8b), e carga de 800g em distância de 100m e 500m (Figuras 5.8c e 5.8d). Para a carga de 500g com distância de 300m, foram realizadas análises em quadruplicada, cujo resultados são mostrados na Figura 5.9.

A Figura 5.8 demonstra que os valores e regimes do COF apresentaram similaridade em todas as condições testadas, com exceção da condição de carga de 200g e distância de 500m (Figura 5.8.d). Na referida condição, observou-se uma instabilidade no valor do COF próximo à distância de 200m, que se prolongou ciclicamente até o final da análise.

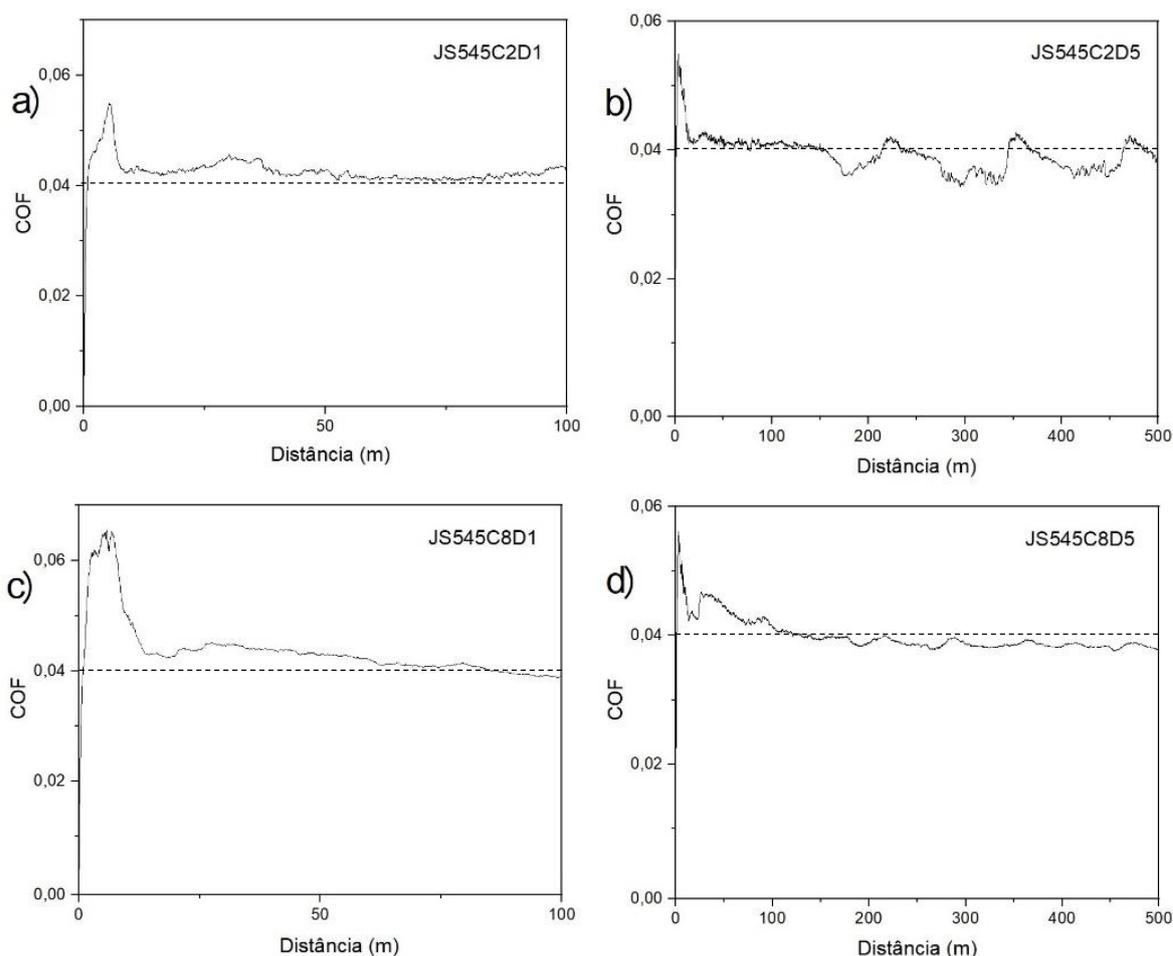


Figura 5.8. Coeficiente de atrito para a blenda JS545 (S500 – 4,5% de etanol) com carga e distância de: a) 200g e 100m, b) 500g e 500m, c) 800g e 100m e d) 800g e 500m.

Para a condição repetida em quadruplicata (carga de 500g com distância de 300m, Figura 5.9), observa-se que os comportamentos foram muito similares, com alguma discrepância para o ensaio 3, que apresentou maiores valores de COF durante os ensaios. Mesmo assim, os valores médios de COF mantiveram-se próximos a 0,04.

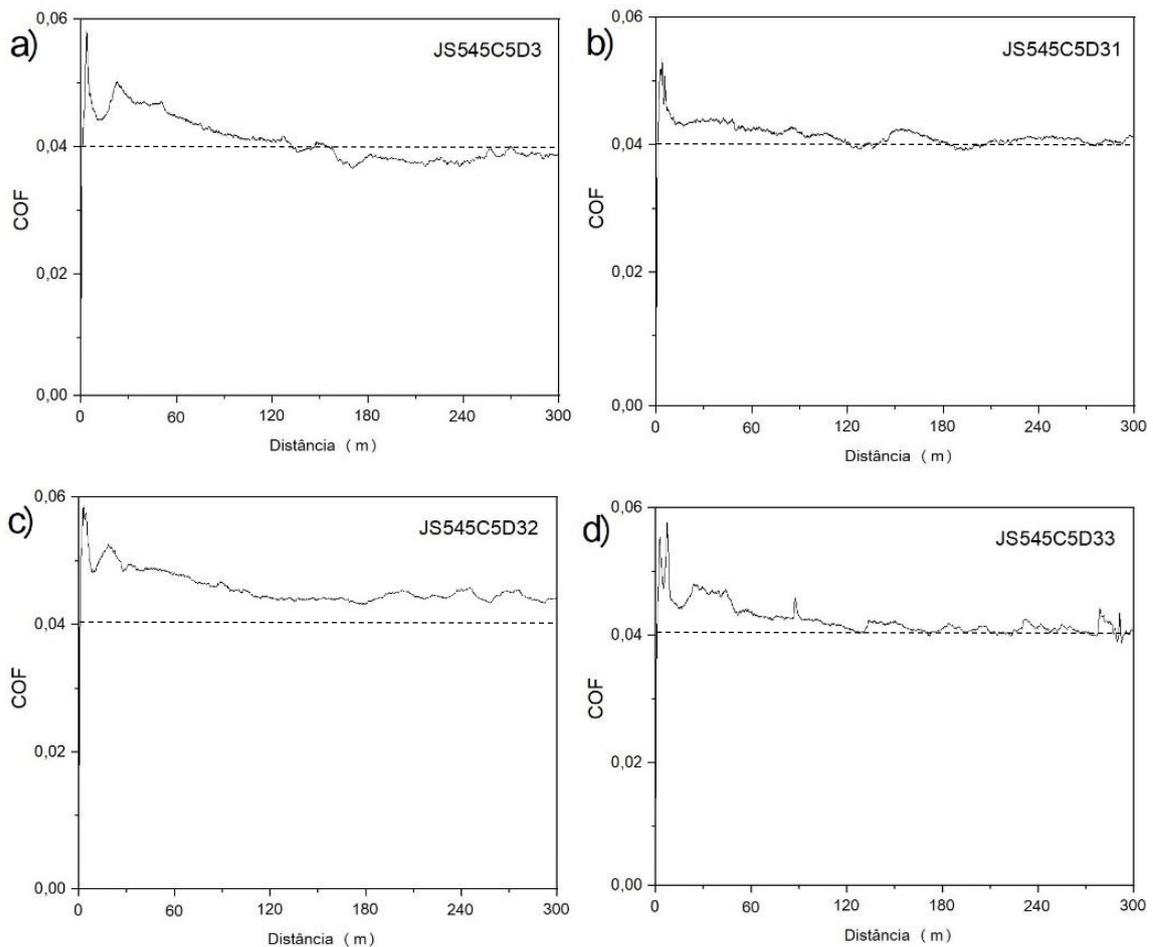


Figura 5.9. Coeficiente de atrito para a blenda JS545 (S500 – 4,5% de etanol) com carga de 500g e distância de 300m – ensaios em quadruplicata..

Ao acrescentar 7% de etanol ao diesel S500, as avaliações do COF foram realizadas para as seguintes condições: carga de 200g com distância de 300m (Figura 5.10a), carga de 500g com distâncias de 100m e 500m (Figuras 5.10b e 5.10c) e carga de 800g com distância de 300m (Figura 5.10d).

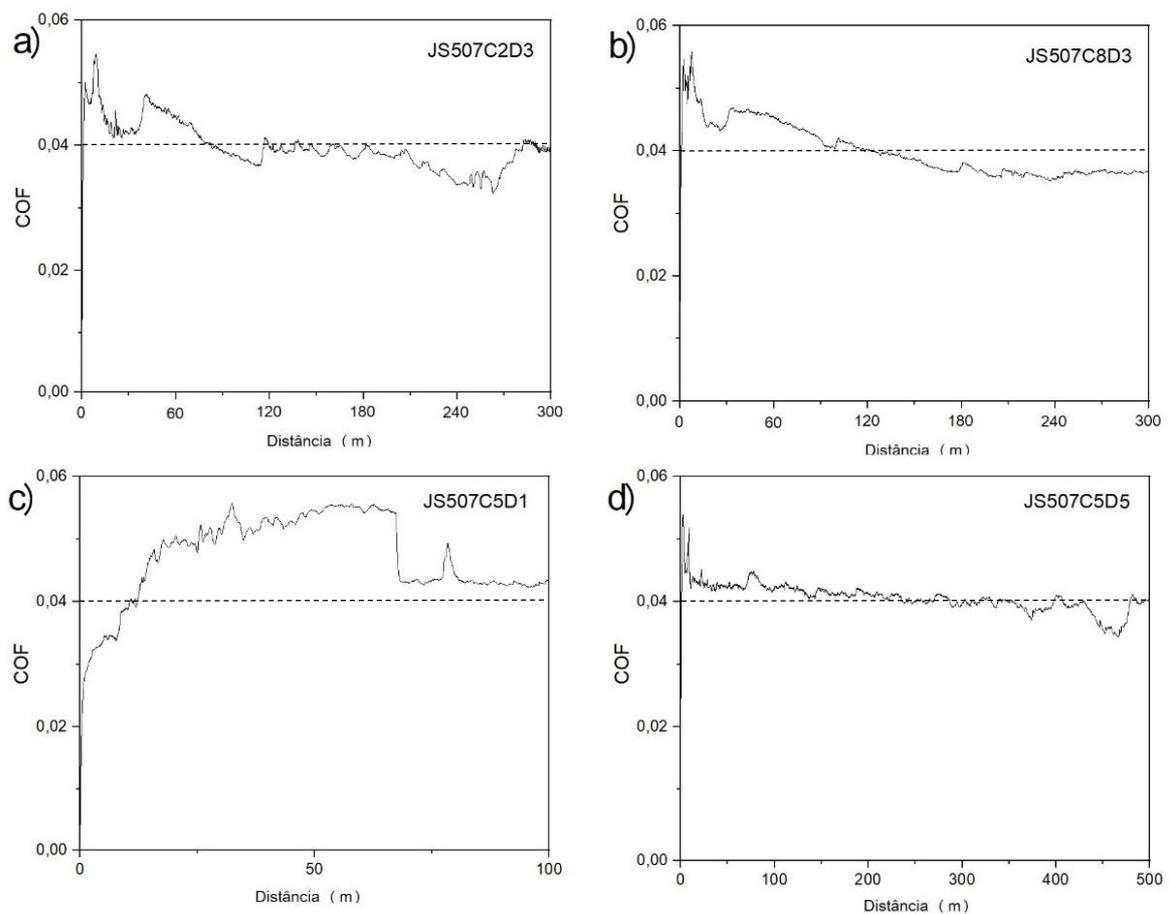


Figura 5.10. Coeficiente de atrito para a blenda JS507 (S500 – 7% de etanol) com carga e distância de: a) 200g e 300m, b) 500g e 100m, c) 500g e 500m, e d) 800g e 300m.

Para a adição de 7% de etanol ao diesel S500, os resultados revelam divergências significativas entre os resultados do COF para a condição de carga de 500g e distância de 100m (Figura 5.10c) em comparação com as demais condições testadas. Especificamente, observa-se um comportamento distinto na referida condição, sem a presença de regime transiente e regime estacionário. O comportamento divergente observado pode ser atribuído a uma falha na etapa de preparação da amostra, pode ter resultado Ra diferente da esperada ou a presença de contaminantes na superfície da amostra.

As instabilidades dos valores do COF observadas durante o HFRR, foram atribuídas por Maru et al. (2014) à mudança nos mecanismos de atrito, a qual se reflete ao tamanho da escara de desgaste (*debris*). Em seu estudo foi pesquisado a curva de Stribeck como método adequado de caracterização da lubricidade de

misturas de biodiesel, com blenda de B20 e óleo diesel. Dessa forma, uma correlação foi estabelecida entre o atrito e o desgaste, evidenciando que as superfícies homogêneas, com poucas irregularidades e baixa incidência de óxidos na escara, apresentaram os menores coeficientes de atrito.

A análise dos resultados do COF revelou uma flutuação nos valores, que podem ser associados a fatores como desgaste, quebra de óxidos, à variação da carga, velocidade e a fenômenos associados com a remoção de debris, assim como das vibrações transmitidas das partes dos componentes móveis do equipamento ou do ambiente. A complexa variação do sinal do coeficiente de atrito por fatores que influenciam indiretamente na referida medida, dificulta o entendimento do papel deste parâmetro no mecanismo de desgaste (PANTALEON, 2004).

Estudos conduzidos por Godet (1990) demonstram que as partículas de desgaste podem, em determinadas circunstâncias, atenuar o desgaste progressivo das superfícies em contato. Essa atenuação é mais comumente observada em baixas frequências de deslizamento. Em contraste, em frequências elevadas, as partículas de desgaste são mais facilmente ejetadas da interface de contato, resultando em danos de desgaste mais severos. A frequência com que a situação se apresenta impacta significativamente o COF, levando a alterações em seu valor.

Constantine, Wang e Terrell (2013) realizaram uma análise do coeficiente de atrito sob o enfoque na frequência. O seu estudo se concentrou na determinação do desempenho tribológico do biodiesel B100 à base de soja dentro de um injetor de combustível. Seus resultados demonstraram que o aumento da frequência ocasionou a diminuição do coeficiente de atrito. Essa redução pode ser atribuída, principalmente, à transição do regime de lubrificação limítrofe para o hidrodinâmico.

Observa-se uma concordância significativa entre os resultados do COF obtidos para as diferentes blendas e as informações presentes na revisão bibliográfica realizada. No trabalho de Farias et al. (2012), os resultados indicaram que as blendas com menor quantidade de enxofre apresentaram menor lubricidade, corroborando

com valores de COF superiores, em comparação as blendas com maior quantidade do mesmo componente.

5.3. Pistas de Desgaste

As análises dos desgastes das amostras foram realizadas com o auxílio de microscopia ótica, e as imagens obtidas permitiram a aferição das dimensões da pista desgastada, incluindo comprimento, largura e raio das calotas desgastadas, utilizando o software TCCapture.

Através da análise quantitativa das dimensões do desgaste, foi possível quantificar a severidade do desgaste em cada amostra e comparar o desempenho das diferentes blendas em termos de lubricidade.

A Figura 5.11 mostra a influência da carga e da distância percorrida no desgaste das pistas na presença da blenda de diesel S10 com 2% de etanol. A análise das imagens indica que o aumento da carga e da distância percorrida tende a gerar um maior desgaste das pistas, com diferentes topografias de desgaste observadas. Observa-se também que para a mesma carga aplicada de 500g, as dimensões da pista de desgaste aumentam com o aumento da distância percorrida, conforme figuras 5.11b e 5.11c. O mesmo também foi notado quando a distância se manteve constante com 300m e a carga foi aumentada de 200g para 800g (Figura 5.11a e 5.11d, respectivamente).

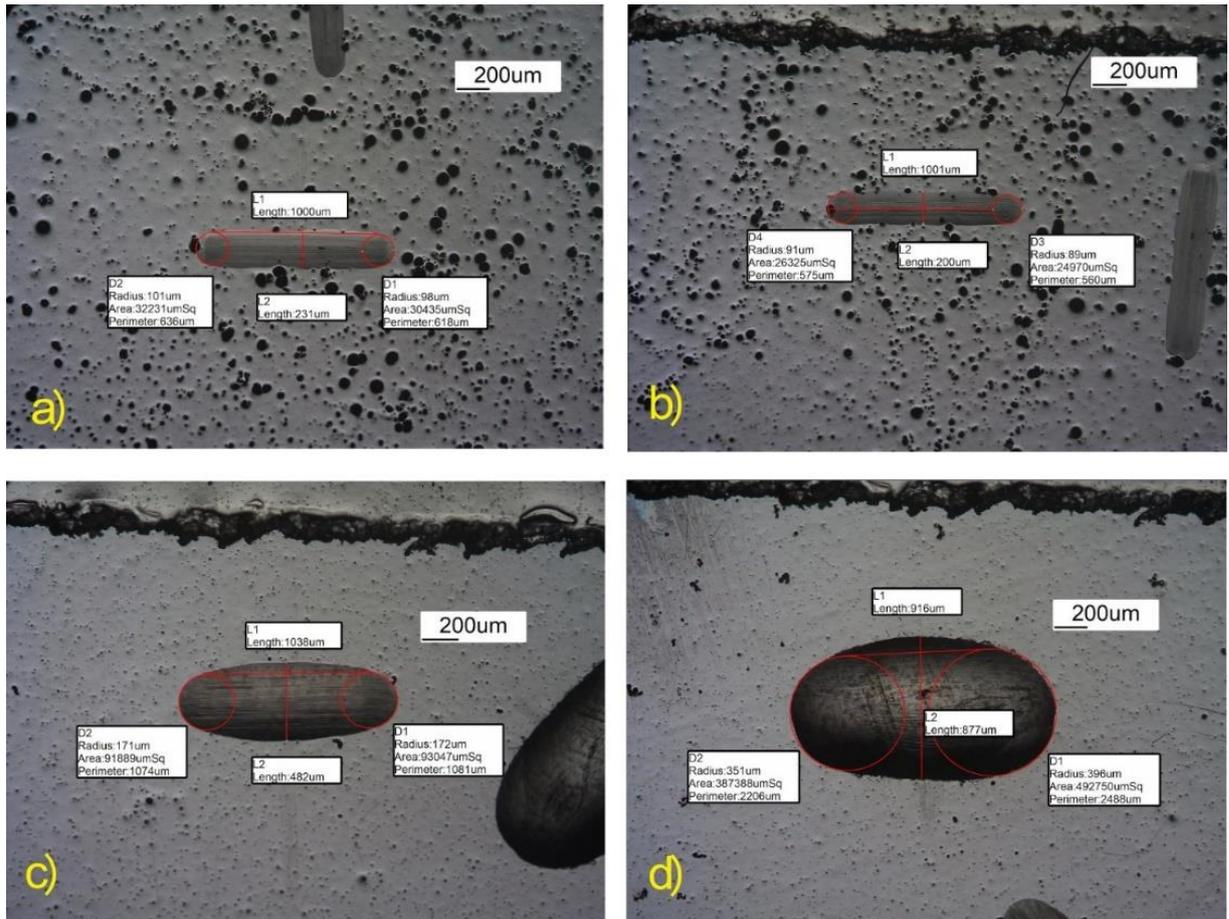


Figura 5.11. Pistas desgastadas revelada pelo microscópio ótico na presença da blenda JS102 com carga e distância: a) 200g, 300m; b) 500g, 100m; c) 500g, 500m; d) 800g, 300m.

A Figura 5.12 evidencia a influência da carga e da distância percorrida no desgaste das pistas na presença da blenda de S10 com 4,5% de etanol. A análise das imagens indica que o aumento da carga e da distância percorrida aumentou o desgaste das amostras, com diferentes dimensões observadas. A comparação entre as imagens das Figuras 5.12a (200g, 100m) e 5.12b (200g, 500m) revela um aumento do desgaste com a distância percorrida na mesma carga, bem como nas Figuras 5.12c e 5.12d para a carga de 800g. Com o aumento das distâncias de 100m para 500m, as pistas desgastadas também aumentaram para ambas as cargas.

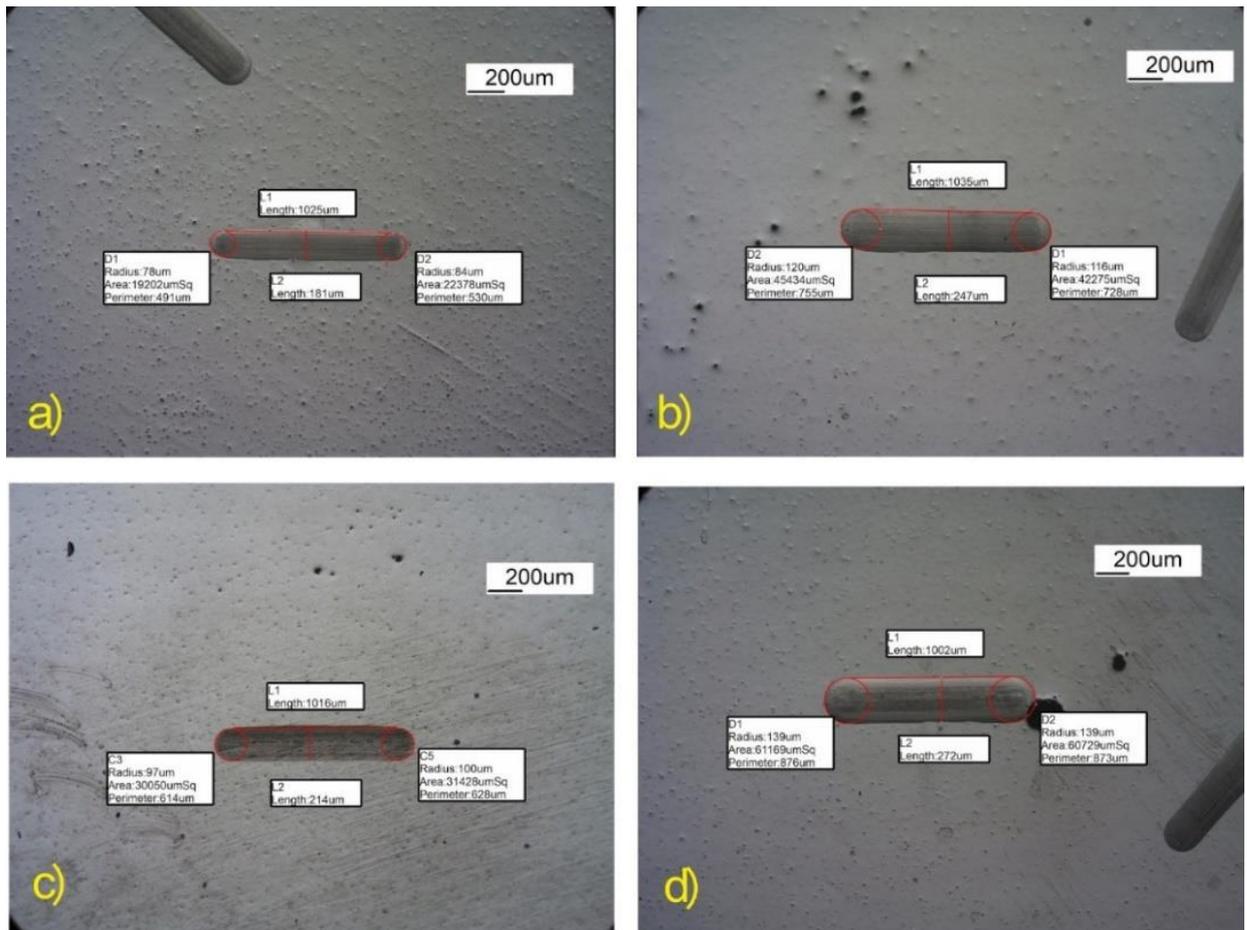


Figura 5.12. Pistas desgastadas revelada pelo microscópio ótico na presença da blenda JS145 com carga e distância: a) 200g, 100m; b) 200g, 500m; c) 800g, 100m; d) 800g, 500m.

A análise da Figura 5.13 fornece informações sobre a repetibilidade do comportamento do desgaste das pistas na presença da blenda diesel S10 com 4,5% de etanol, sob carga de 500g e distância percorrida de 300m. As imagens revelam um desgaste superficial com sulcos rasos, áreas de abrasão e perda de material, com desgaste superficial relativamente uniforme. Para todas as pistas de desgaste as dimensões tanto de largura como de comprimento ficaram entre 230 µm e 250 µm e 1007µm e 1026µm, respectivamente, demonstrando que os ensaios produzem resultados com pouca dispersão entre as repetições.

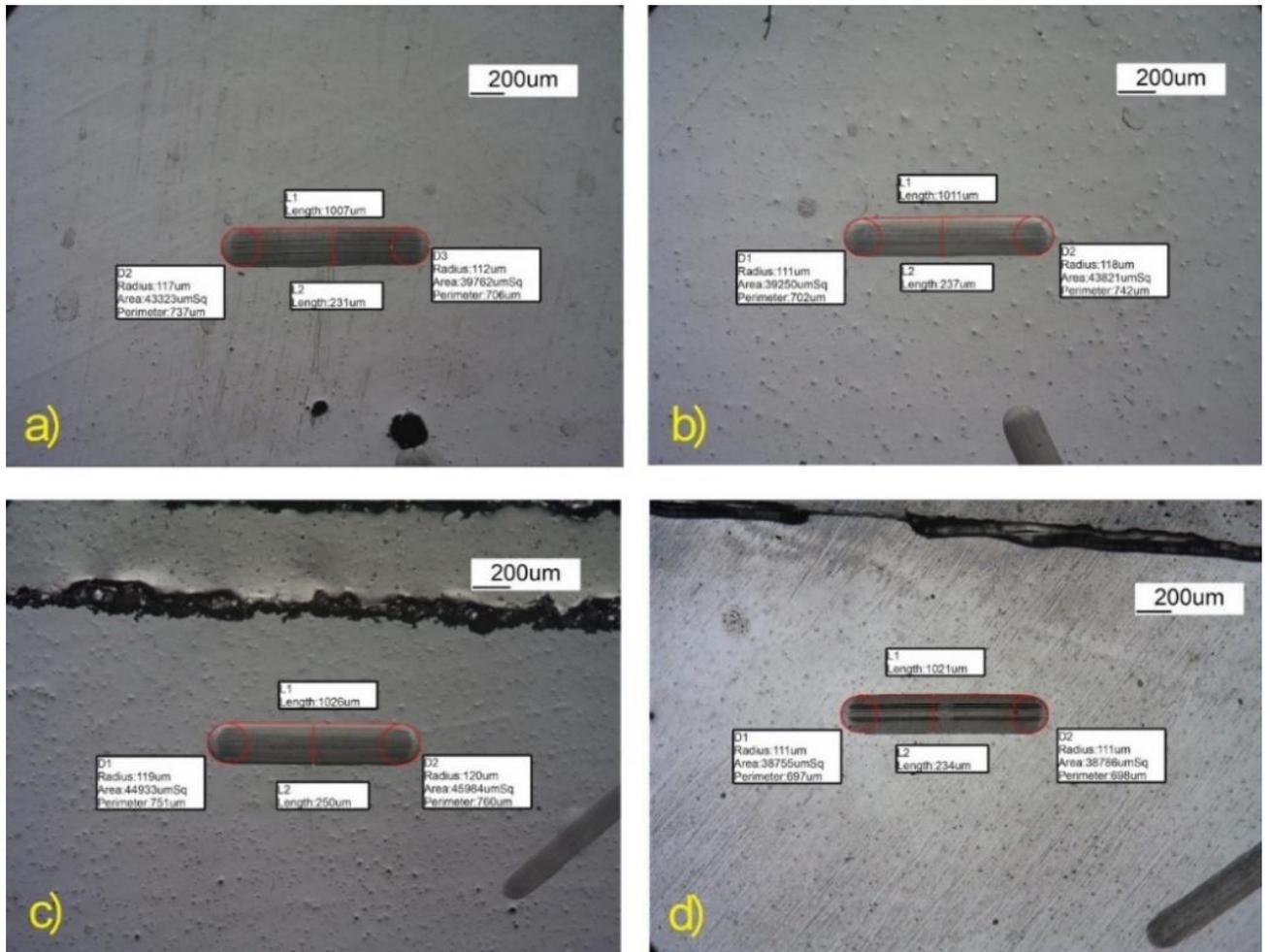


Figura 5.13. Pistas desgastadas revelada pelo microscópio óptico na presença da blenda JS145 com carga de 500g e distância de 300m.

A análise da Figura 5.14 permite verificar a influência da carga e da distância percorrida no desgaste das pistas na presença da blenda diesel S10 com 7% de etanol. É interessante observar que quando a carga se manteve constante em 500g e a distância percorrida aumentou de 100m para 500m (Figura 5.14b e 5.14c) as dimensões das pistas sofreram pouca variação (menor que 6% na largura apenas), indicando que a adição de 7% de etanol auxiliou na melhora da lubricidade da blenda. Comportamento similar foi observado para os aumentos de carga.

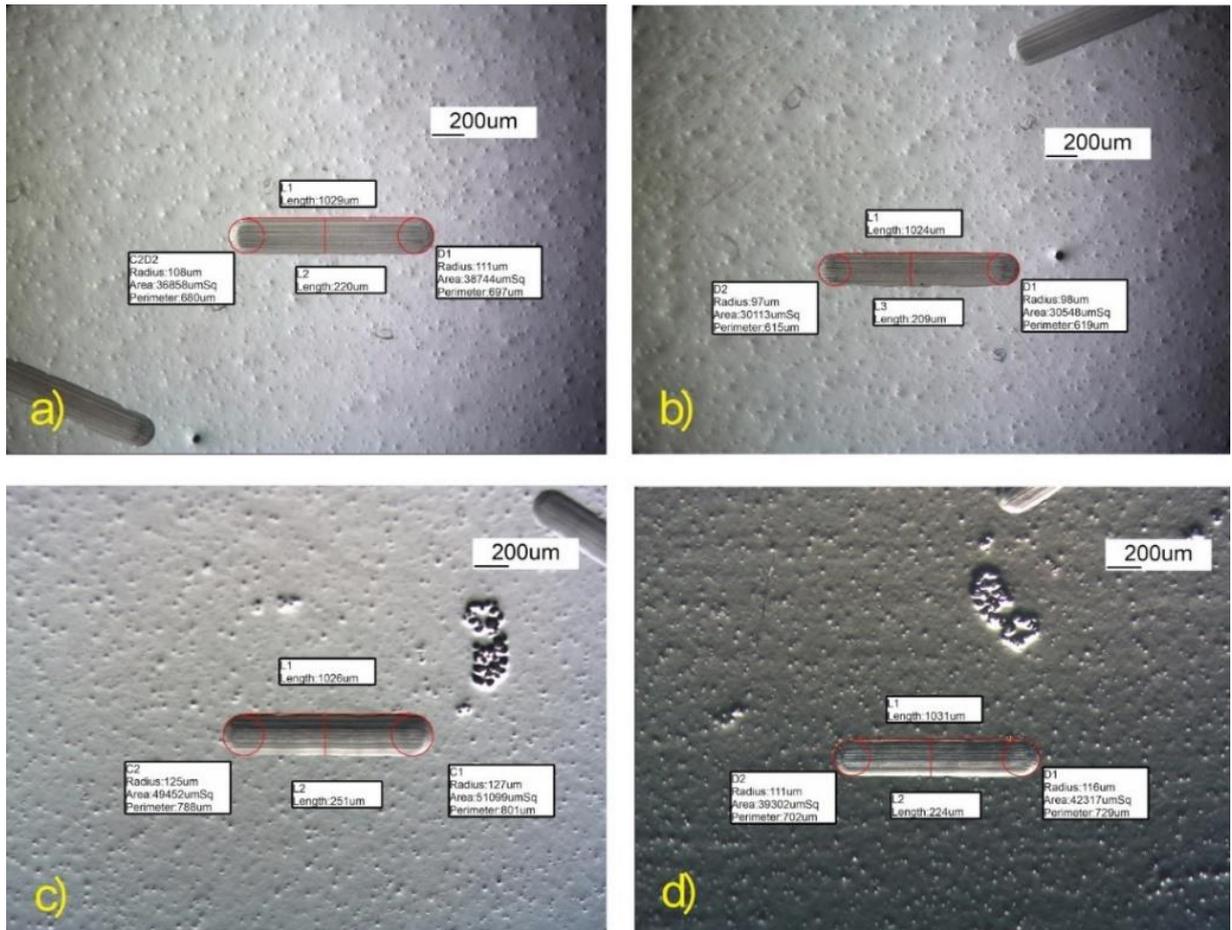


Figura 5.14. Pistas desgastadas revelada pelo microscópio ótico na presença da blenda JS107 com carga e distância: a) 200g, 300m; b) 500g, 100m; c) 500g, 500m; d) 800g, 300m.

A Figura 5.15 apresenta um conjunto de imagens obtidas que revelam o desgaste das pistas sob a influência da blenda S500 composta por diesel e 2% de etanol. As imagens foram capturadas em diferentes condições de carga e distância percorrida, permitindo uma análise abrangente dos efeitos desses parâmetros no processo de desgaste.

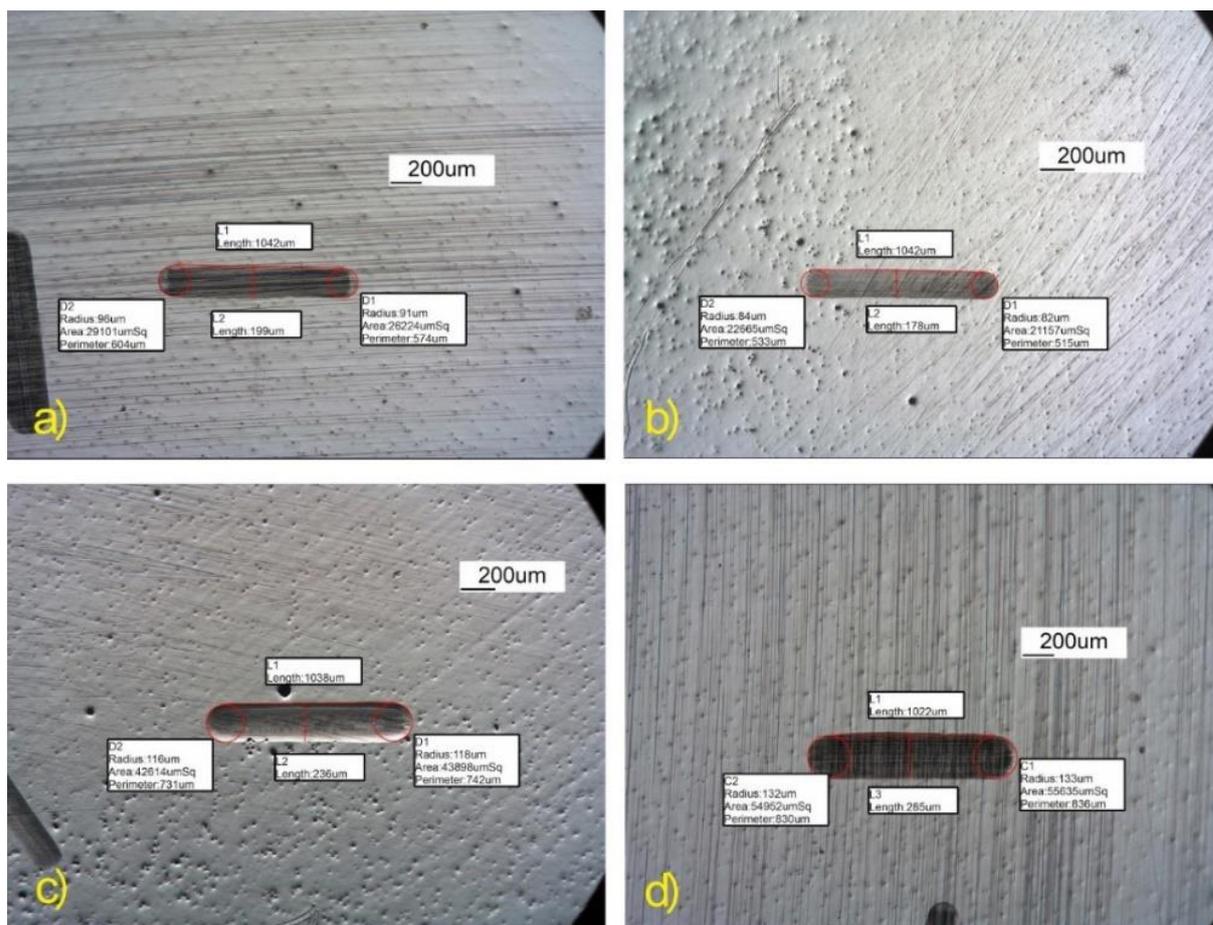


Figura 5.15. Pistas desgastadas revelada pelo microscópio ótico na presença da blenda JS502 com carga e distância: a) 200g, 300m; b) 500g, 100m; c) 500g, 500m; d) 800g, 300m.

Para esta blenda observa-se que o aumento da carga levou o aumento da largura da pista de desgaste de 199µm para 265µm quando a carga aumenta 600g, com a mesma distância percorrida de 300m. Quando a carga manteve constante em 500g e as distâncias foram de 100m para 500m, o comportamento observado é observado. É importante notar que quando comparados os comportamentos entre as blendas de S10 e S500 com o teor de 2% de etanol, aqueles com diesel S10 apresentam desgaste bem mais acentuados, principalmente com maior carga.

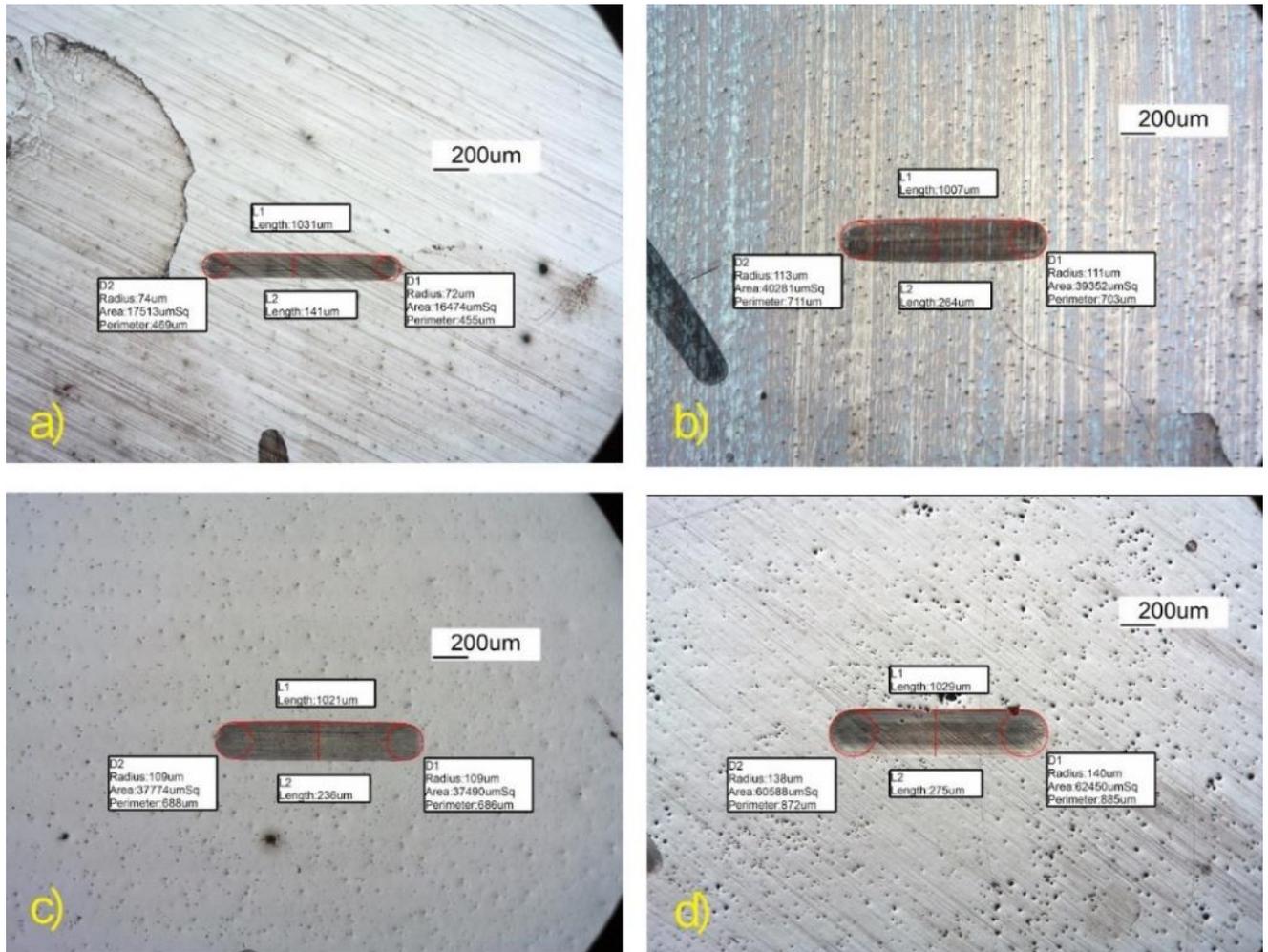


Figura 5.16. Pistas desgastadas revelada pelo microscópio ótico na presença da blenda JS545 com carga e distância: a) 200g, 100m; b) 200g, 500m; c) 800g, 100m; d) 800g, 500m.

Para o teor de 4,5% de etanol adicionado ao diesel S500 as variações observadas nas pistas de desgaste foram maiores com o aumento da distância percorrida para ambas as cargas de 200g e 800g, com aumentos percentuais de 47% e 15%, respectivamente, para as larguras das pistas. Comparando com os resultados do S10, as diferenças observadas não foram tão significativas para este teor de etanol adicionado.

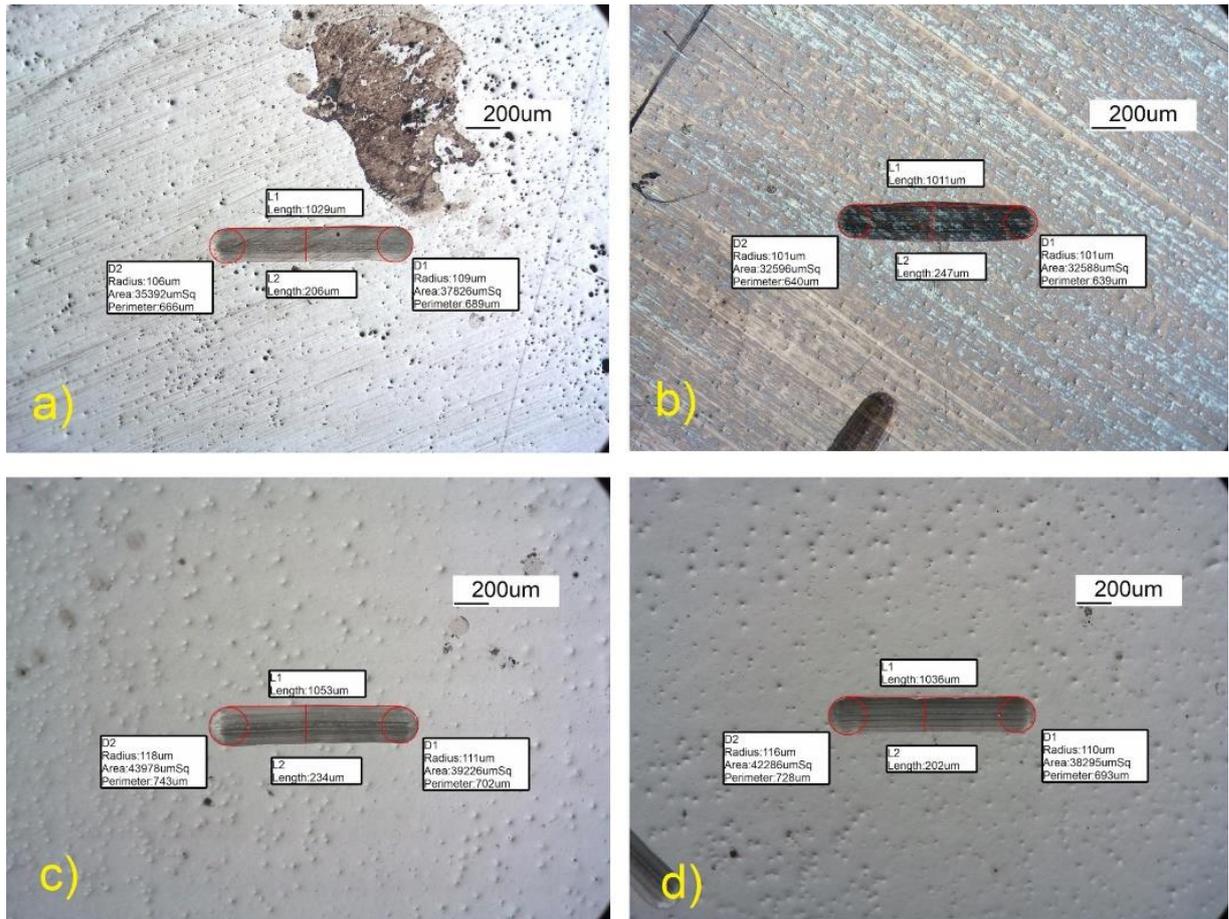


Figura 5.17. Pistas desgastadas revelada pelo microscópio ótico na presença da blenda JS545 com carga de 500g e distância de 300m.

A Figura 5.17 possibilita a avaliação da repetibilidade do comportamento do desgaste das pistas, sujeitas à ação da blenda de diesel S500 com 4,5% de etanol, sob uma carga de 500g e percorrendo uma distância de 300m. As imagens revelam um desgaste superficial caracterizado por sulcos rasos, áreas de abrasão e perda de material, os quais apresentam uma distribuição relativamente uniforme. As dimensões de largura e comprimento das áreas de desgaste variaram entre 206 µm e 247 µm, e entre 1011 µm e 1053 µm, respectivamente. Esta estreita faixa de valores demonstra a baixa dispersão dos resultados entre as repetições dos ensaios, indicando confiabilidade e repetibilidade no comportamento do desgaste sob as condições testadas.

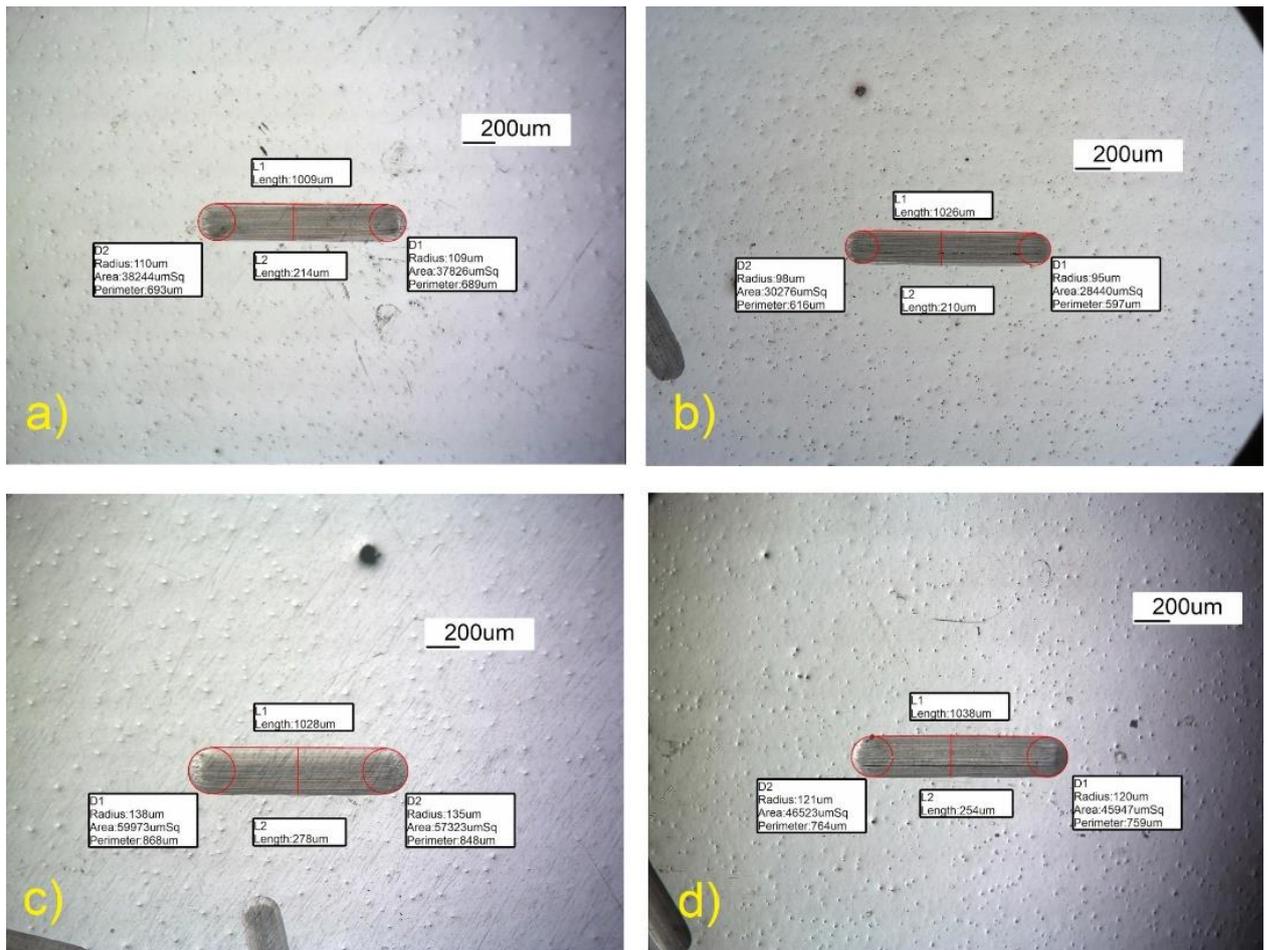


Figura 5.18. Pistas desgastadas revelada pelo microscópio ótico na presença da blenda JS507 com carga e distância: a) 200g, 300m; b) 500g, 100m; c) 500g, 500m; d) 800g, 300m.

A análise da Figura 5.18 proporciona uma análise acerca da influência da carga e da distância percorrida no desgaste das pistas quando expostas à mistura de diesel S500 com 7% de etanol. A análise das imagens sugere que o aumento da carga e da distância percorrida resultou em um incremento no desgaste das amostras, observando-se diferentes dimensões. A comparação entre as imagens das Figuras 5.18b (500 g, 100 m) e 5.18c (500 g, 500 m) revela um aumento no desgaste proporcional à distância percorrida, mantendo-se a mesma carga. Enquanto isso, nas Figuras 5.18a e 5.18d, para uma distância de 300g, observou-se um aumento no desgaste das pistas conforme a carga variou de 200 g para 800 g.

A análise das dimensões da pista desgastada em relação às blendas utilizadas revelou uma correlação significativa entre pista desgastada e carga. Observou-se que

o aumento das dimensões da pista desgastada está diretamente relacionado ao aumento da carga aplicada. Em outras palavras, quanto maior a carga, maior será o desgaste da pista, conforme evidenciado pelos resultados das análises. Essa relação pode ser explicada por diversos fatores, como, o aumento da fricção entre a superfície da pista e a esfera e o aumento da temperatura na região de contato, intensificando o desgaste.

5.4. Volumes Desgastados

Após a análise das pistas de desgaste e a aferição de suas dimensões, as áreas destas foram determinadas. Através da utilização da Equação (4.6), segundo Norma ASTM G133, em conjunto com a calculadora de desgaste, foi possível mensurar o volume desgastado das amostras. Os resultados podem ser observados na Tabela 6.1.

Tabela 5.1. Volumes desgastados em função das blendas, cargas e distâncias

Etanol %	Carga (g)	Distância (m)	Diesel	Volume (mm³)
2	200	300	10	0,0163
2	500	500	10	0,0189
2	500	100	10	0,0132
2	800	300	10	0,0137
4,5	200	100	10	0,0107
4,5	200	500	10	0,0231
4,5	500	300	10	0,0204
4,5	500	300	10	0,0217
4,5	500	300	10	0,0217
4,5	500	300	10	0,0237
4,5	800	100	10	0,0159
4,5	800	500	10	0,0324
7	200	300	10	0,0198
7	500	100	10	0,0156
7	500	500	10	0,0265
7	800	300	10	0,0213
2	200	300	500	0,0143
2	500	100	500	0,0112
2	500	500	500	0,0227

2	800	300	500	0,0294
4,5	200	100	500	0,0086
4,5	200	500	500	0,0208
4,5	500	300	500	0,0168
4,5	500	300	500	0,0217
4,5	500	300	500	0,0211
4,5	500	300	500	0,0191
4,5	800	100	500	0,0196
4,5	800	500	500	0,0324
7	200	300	500	0,0200
7	500	100	500	0,0153
7	500	500	500	0,0312
7	800	300	500	0,0241

Com base nos dados da Tabela 6.1, se observa que o volume desgastado tende a aumentar com o teor de etanol no diesel. Isso pode ser explicado pela menor viscosidade do etanol em comparação com o diesel, o que facilita o escoamento do combustível e conseqüentemente, aumenta o desgaste da superfície. Em concordância com a pesquisa de OLIVEIRA (2007) que evidencia uma tendência de crescimento do desgaste à medida que aumenta a concentração de álcool na composição da mistura, especialmente acima de 9% de etanol. A Figura 5.19 apresenta uma comparação detalhada entre duas porcentagens de etanol (2% e 7%) em blendas de diesel S10 e S500, mantendo as demais variáveis constantes (carga de 200g e distância de 300m). A análise revela que, em ambos os casos, o aumento do teor de etanol tende a elevar o volume desgastado.

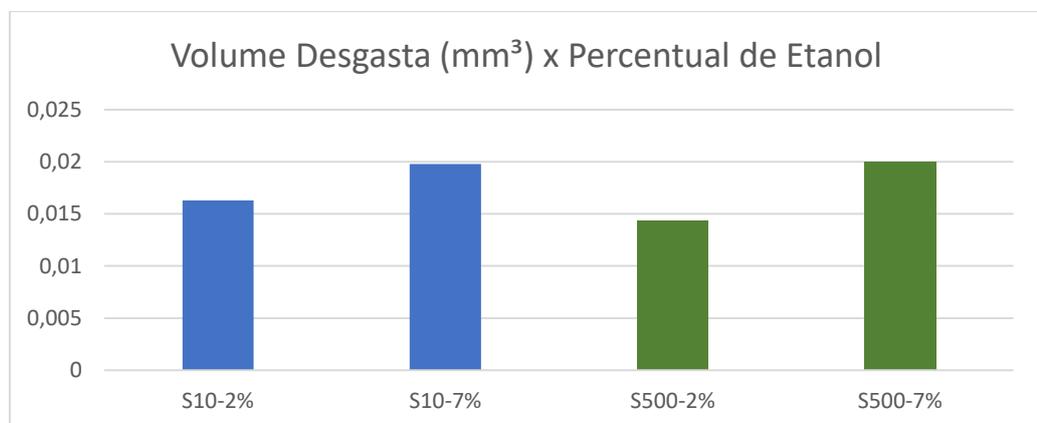


Figura 5.19. Relação entre diferentes percentuais de etanol, com mesma carga (200g) e distância (300m) e o volume desgastado.

O volume desgastado também aumenta com o aumento da carga aplicada. Isso pode ser explicado pelo maior atrito entre a esfera e amostra sob carga mais elevada, levando a um maior desgaste. A Figura 5.20 ilustra a relação entre a carga e o volume desgastado para a blenda de 4,5% percorrendo a distância de 500 metros em diferentes tipos de diesels. Observa-se que, para cada tipo de diesel, o volume desgastado aumenta significativamente à medida que a carga aplicada aumenta, de 200g para 800g.

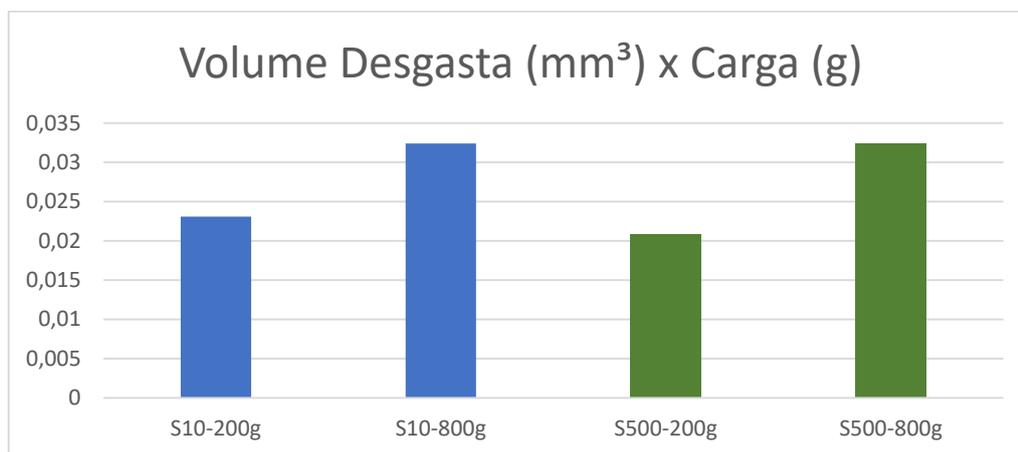


Figura 5.20. Relação entre diferentes cargas (200g e 800g), com o mesmo percentual de etanol 4,5%, mesma distância 500m e o volume desgastado.

A Tabela 6.1 revela que o volume desgastado aumenta com o aumento da distância percorrida. Isso pode ser atribuído ao maior tempo de exposição da amostra às condições de atrito e desgaste, resultando em um maior desgaste da superfície. A Figura 5.21 demonstra a relação entre a distância percorrida e o volume desgastado para a mesma blenda com 4,5% de etanol e distância inicial de 500 metros. Ao analisar os dados, observa-se que, à medida que a distância percorrida aumenta de 200 metros para 500 metros, o volume desgastado também aumenta.

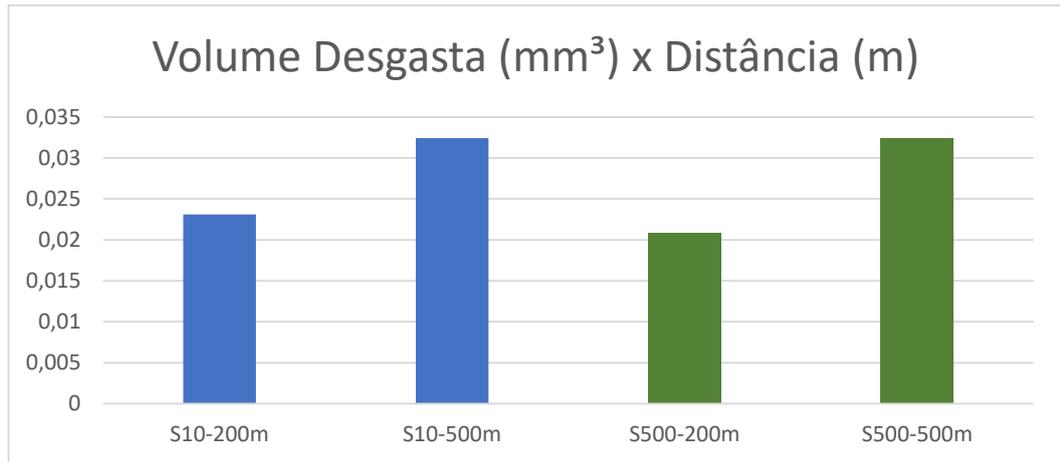


Figura 5.21. Relação entre diferentes distâncias (100m e 500m), com o mesmo percentual de etanol 4,5%, mesma distância 500m e o volume desgastado.

Farias et al. (2012) realizaram um estudo comparativo dos valores de lubricidade entre os combustíveis diesel S1800, S500 e S50. O estudo observou que a redução no teor de enxofre contribuiu para a diminuição da lubricidade desses combustíveis. No entanto, a lubricidade pode ser restaurada com a adição de biodiesel. Eles ainda acrescentaram o coeficiente de atrito como outra forma de se avaliar a lubricidade dos combustíveis, visto que a escara de desgaste assume diferentes morfologias.

5.5. Microscopia Eletrônica de Varredura

As análises microscópicas da pista de desgaste das amostras foram realizadas através do microscópio eletrônico de varredura (MEV). Através da análise, foi possível determinar o mecanismo de desgaste individualmente associado a cada tipo de blenda na amostra em questão, as Figuras 5.22 a 5.26 apresentam as imagens.

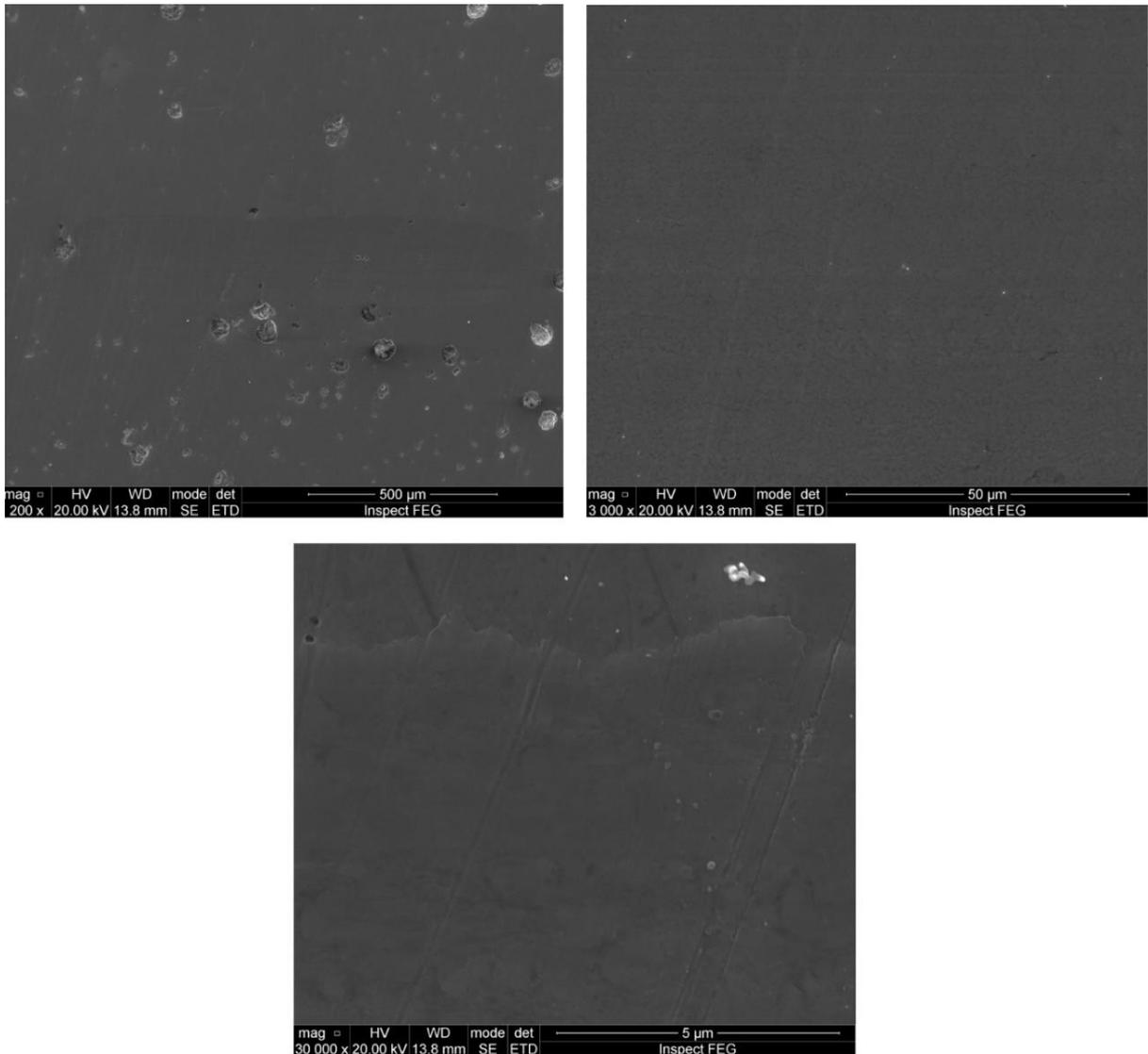


Figura 5.22. JS102 com carga de 200g e distância de 300m.

A análise obtida da região específica da amostra, Figura 5.22, revelou a presença de um defeito superficial denominado microcrateração, o qual pode ter sido originado pelo mecanismo de desgaste por fadiga superficial. Cumpre salientar que, de acordo com Norton (2004), a fadiga superficial não se configura como um fator determinante na formação de defeitos superficiais entre duas superfícies em contato sob deslizamento. Corroborando essa perspectiva, as crateras observadas caracterizam-se como fraturas resultantes de desgaste abrasivo, conforme elucida TEIXEIRA (2011).

Sob cargas de maior grandeza, equivalentes a 500g, mesmo em distâncias relativamente curtas de 100m, a região analisada da amostra apresentou, além de deformação na pista desgastada, indícios de microcorte abrasivo, conforme ilustrado na Figura 5.23, encontrou regiões com craterações geradas por fraturas, originadas por desgaste abrasivo, conforme descrito por STACHOWIAK (2014).

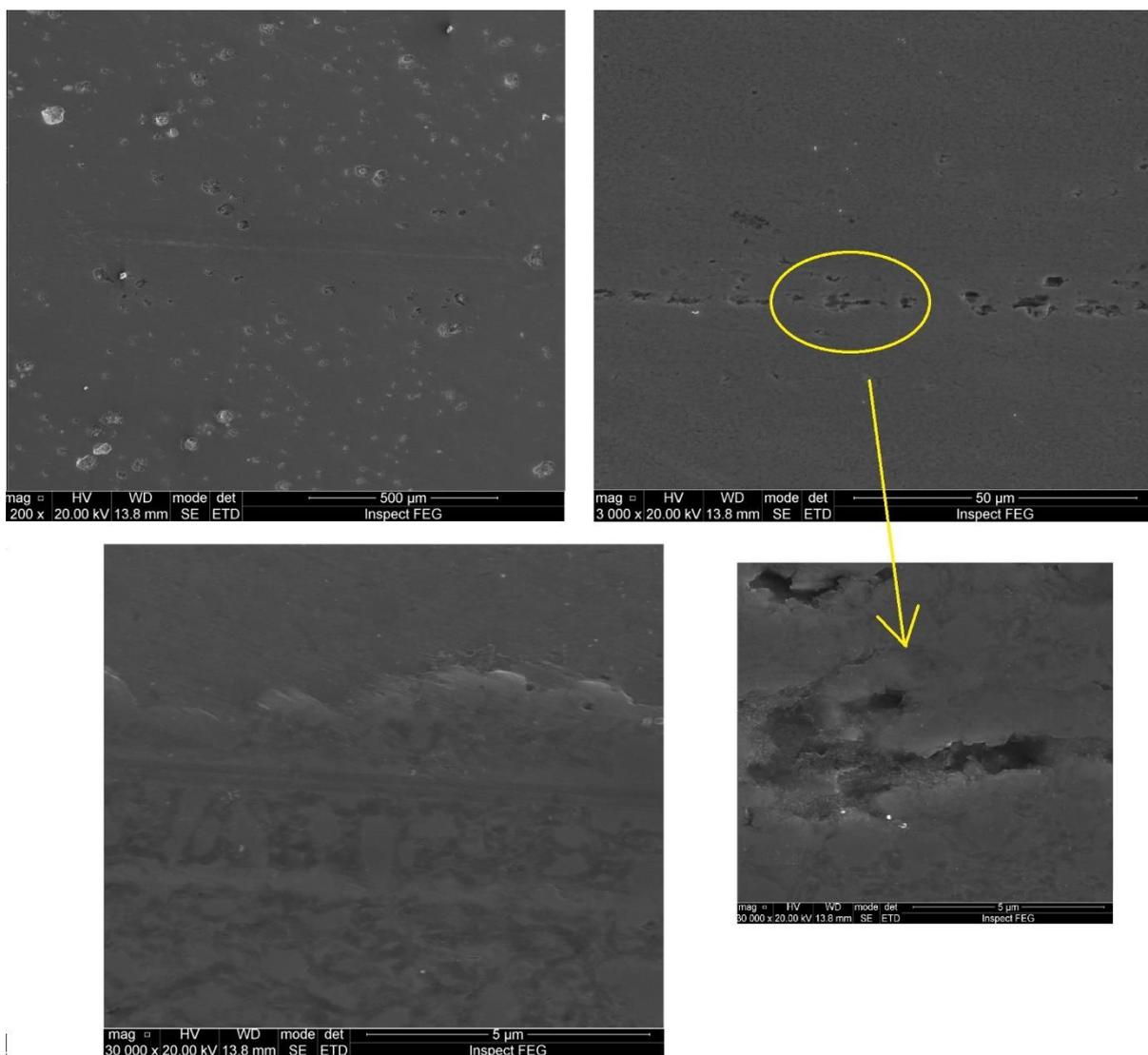


Figura 5.23. JS102 com carga de 500g e distância de 100m.

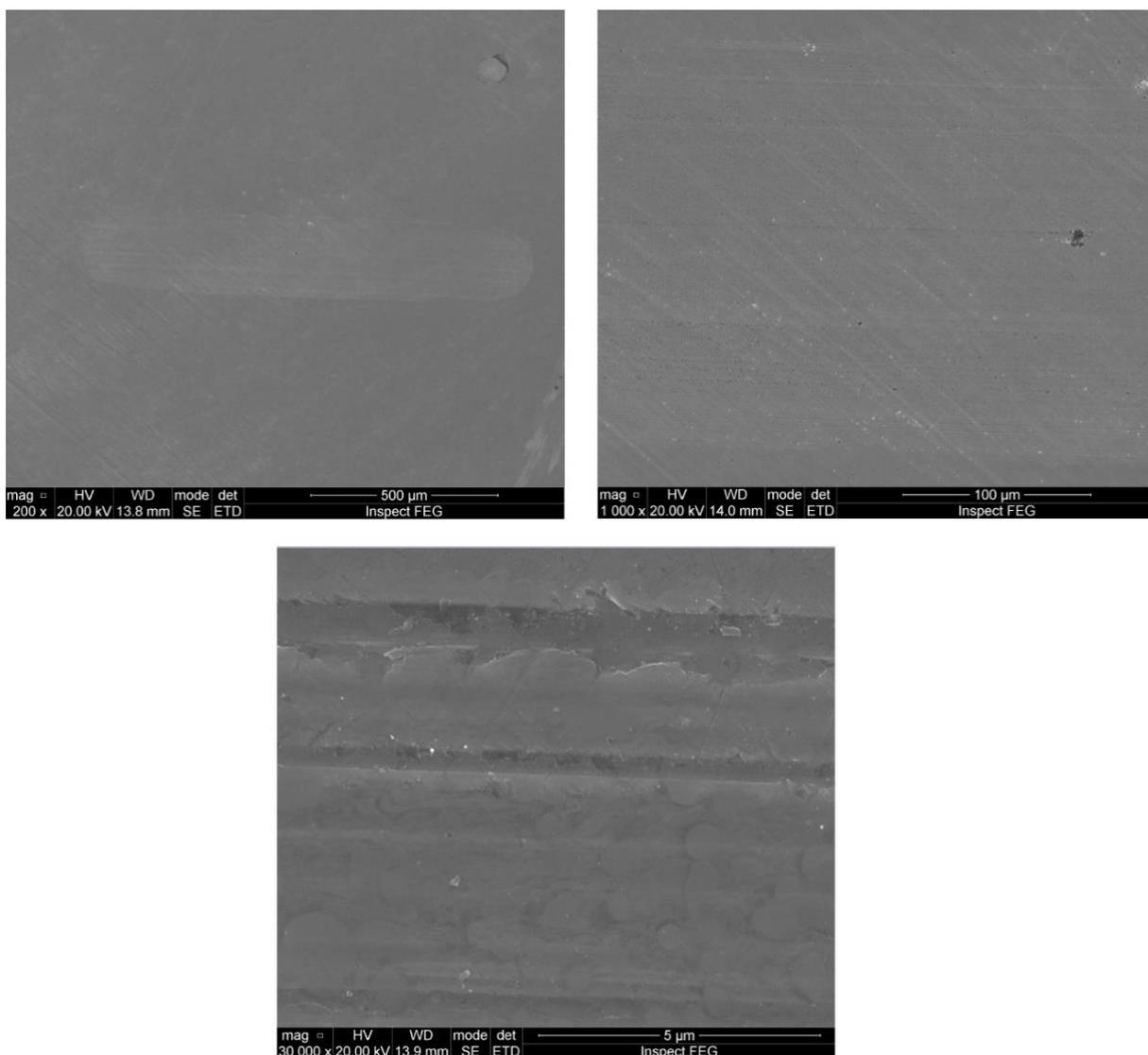


Figura 5.24. JS107 com carga de 500g e distância de 100m.

Em ensaios realizados com cargas de menor magnitude e baixos teores de etanol, foi possível observar uma deformação evidente do material da pista desgastada no local de deslocamento da esfera durante o teste de HFRR. Isto pode ser verificado na Figura 5.25.

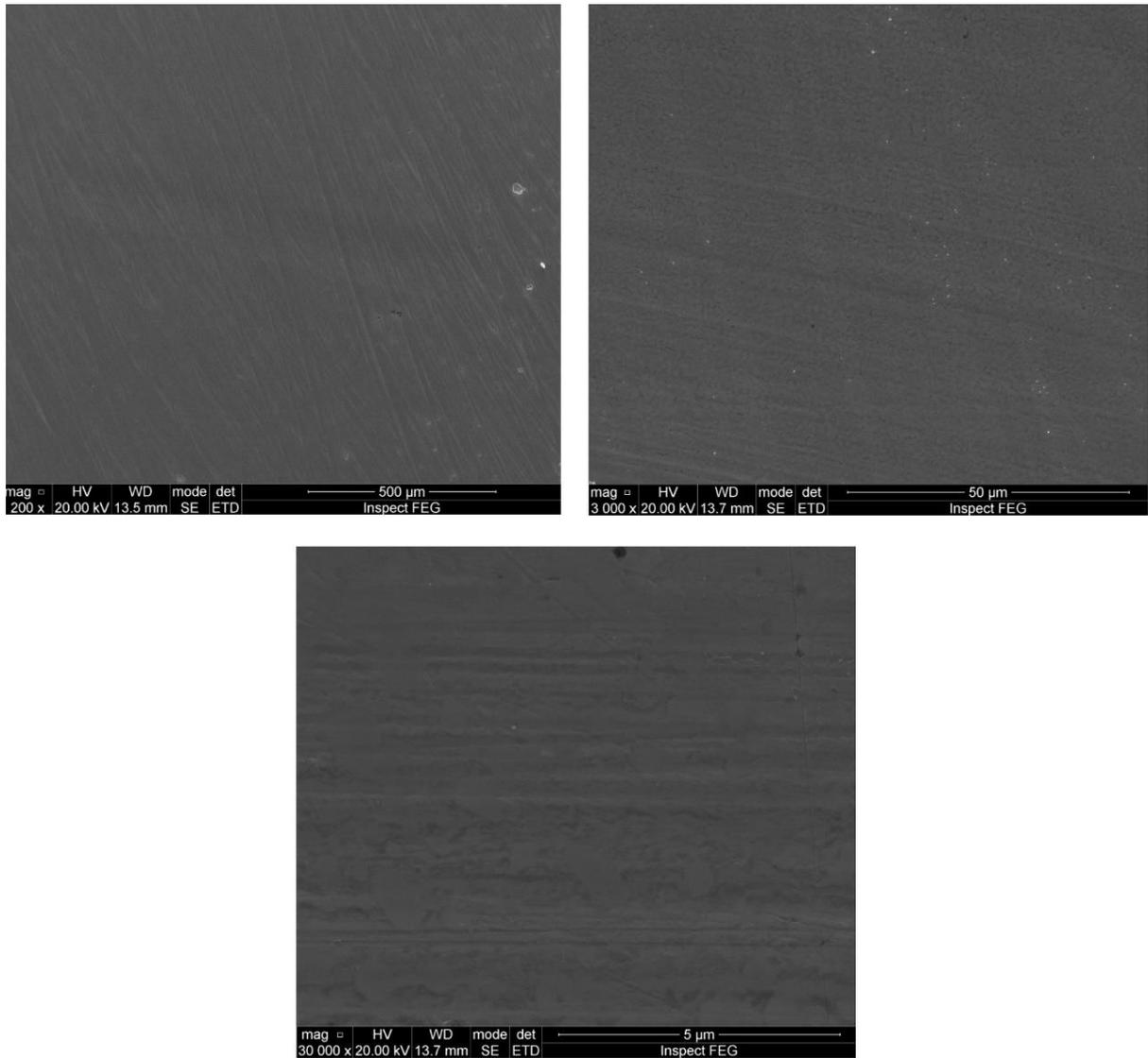


Figura 5.25. JS502 com carga de 500g e distância de 100m.

Quando o material é deslocado para fora da pista desgastada, o material se deforma consideravelmente, como mostrado na Figura 5.26, de maneira que a camada formada se torna quebradiça e, depois de alguns ciclos, pode haver o desprendimento do material, surgindo as partículas de desgaste. Por isto, o prolongamento do ensaio, isto é, o aumento dos ciclos de deslizamento contribuiu para aumento da escara de desgaste, acúmulo e desprendimento de material na região do perímetro da pista desgastada.

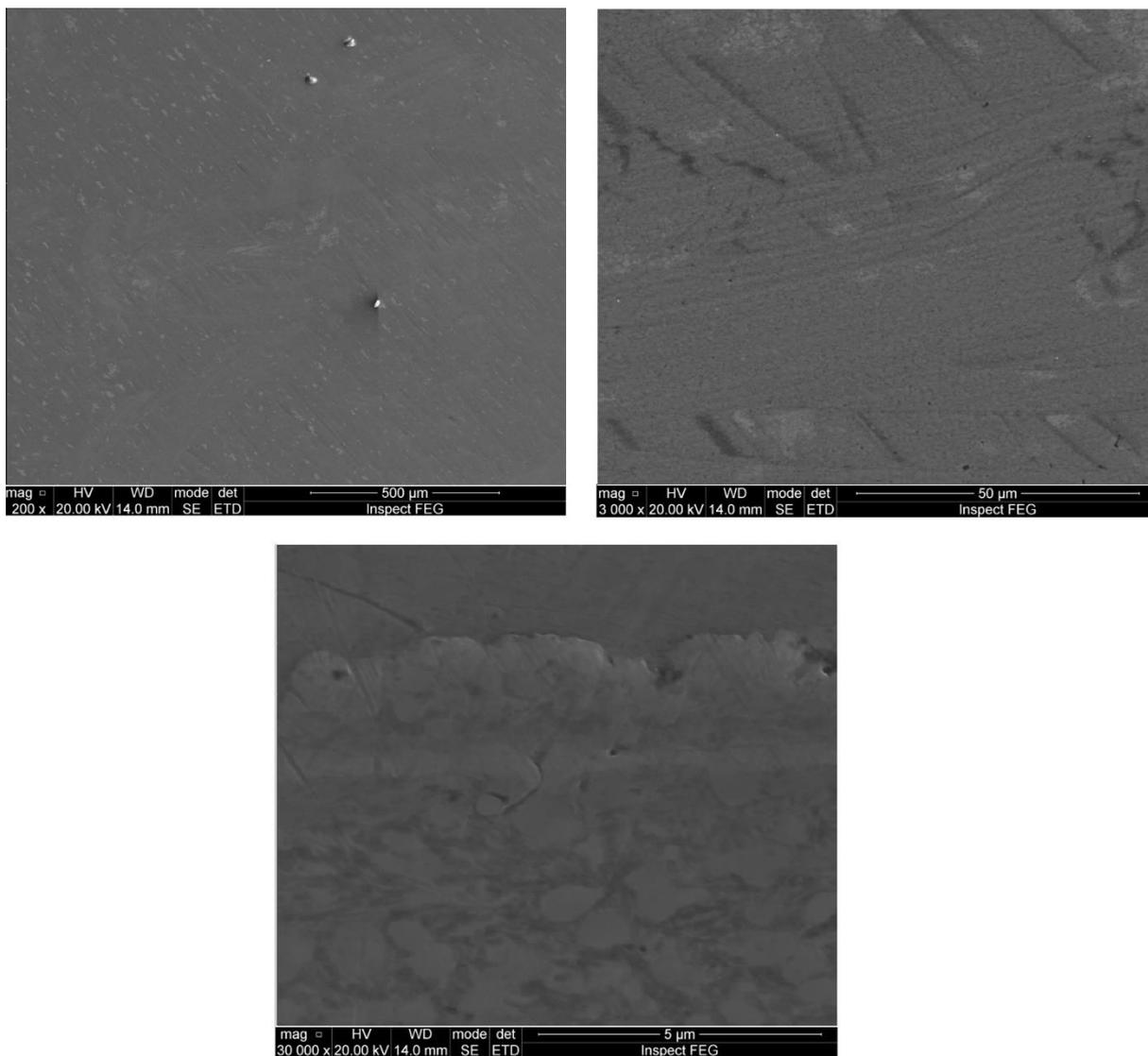


Figura 5.26. JS507 com carga de 500g e distância de 500m.

5.6. Análise de Superfície de Resposta

5.6.1. Para o COF

O modelo de superfície de resposta para o COF apresentou significância estatística com um coeficiente de determinação R^2 de 0,03099. Isso indica que o modelo explica 3,099% da variabilidade na resposta, o que é considerado um valor baixo, como mostrado na Figura 5.27. Em relação ao valor de F_{valor} , que indica se uma variável independente não possui efeito significativo sobre a variável resposta, este foi superior a 0,05 para todas as variáveis analisadas. Esse resultado sugere que

todas as variáveis independentes consideradas neste estudo exercem influência significativa sobre a variável resposta.

Coded Coefficients		
	Value	Standard Error
(Intercept)	0,04102	8,19481E-4
Blenda	4,74794E-4	0,00116
Carga	6,66225E-4	0,00116
Distancia	-3,5319E-4	0,00116
Diesel10	5,47303E-4	8,19481E-4

Statistics	
	COF
Degress of Freedom	27
Root Mean Square of Error	0,00464
R-Square	0,03699
Adj. R-Square	-0,10567
Residual Sums of Squares	5,80218E-4
Predicted. R-Square	0,27123

ANOVA					
	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Blenda	1	3,60687E-6	3,60687E-6	0,16784	0,68527
Carga	1	7,10169E-6	7,10169E-6	0,33047	0,57014
Distancia	1	1,99589E-6	1,99589E-6	0,09288	0,76289
Diesel	1	9,58531E-6	9,58531E-6	0,44604	0,50989
Error	27	5,80218E-4	2,14896E-5		
Lack of fit	21	5,54729E-4	2,64157E-5	6,21803	0,01556
Pure Error	6	2,54894E-5	4,24823E-6		
Total	31	6,02508E-4			

Figura 5.27. Resultados da superfície de respostas do DOE, para os restados do COF.

Na Figura 5.28 *Main Effect Plot no OriginPro* se configura como uma ferramenta robusta para visualizar os efeitos individuais de cada fator em um experimento. Essa ferramenta fornece uma representação gráfica da influência de cada fator na variável resposta, permitindo uma rápida identificação dos fatores que exercem maior impacto e em qual direção.

A Figura 5.28 revela que a carga possui um efeito positivo e estatisticamente significativo sobre o COF. Em outras palavras, à medida que a carga aumenta, o valor do COF também aumenta. Os níveis de carga de 600g e 800g apresentam um efeito mais expressivo no COF do que a média geral, com o nível de 800g exercendo o efeito mais significativo.

Um efeito similar pode ser observado em relação à blenda, quanto maior o percentual de etanol, maior o valor do COF. Já no caso da distância, o efeito é inverso,

quanto maior a distância menor o valor do COF, esse efeito pode ser explicado pelo regime estacionário alcançado em maiores distâncias. Por fim, em relação ao diesel, o tipo S10 apresentou um efeito maior que o S500 na resposta do valor do COF.

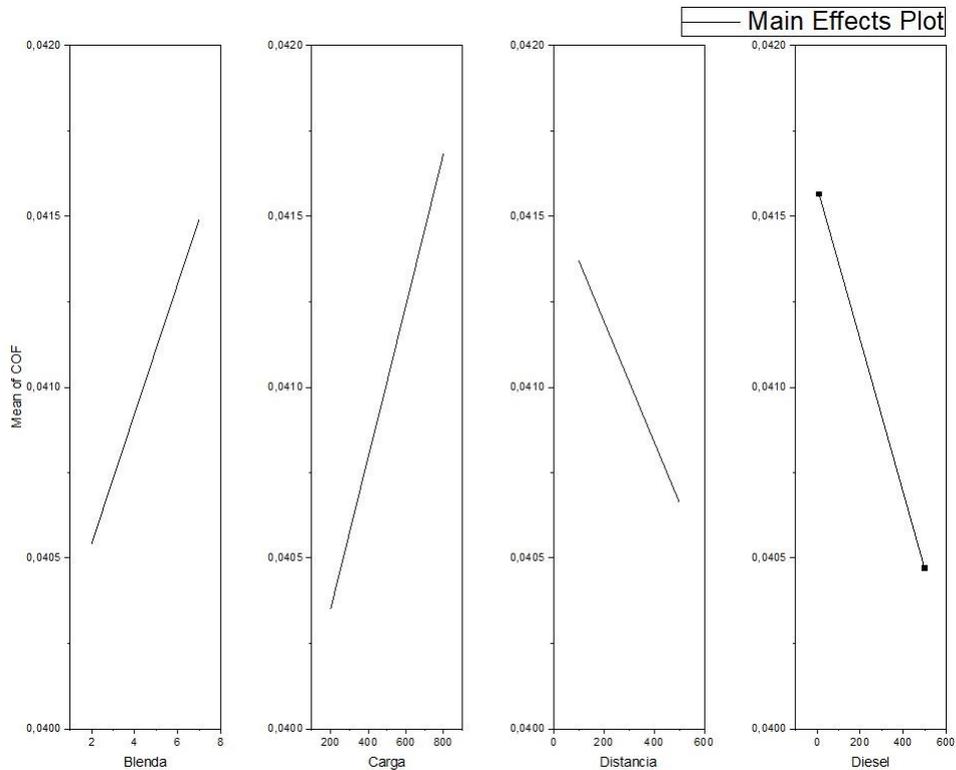


Figura 5.28. Main Effect Plot em função da variável COF.

5.6.2. Para o Volume Desgastado

A análise de superfície de resposta para o volume desgastado indica que o modelo de regressão, com quatro variáveis independentes, apresenta um ajuste insatisfatório. O R^2 de 0,54865, embora represente uma explicação de 54,86% da variabilidade do volume desgastado, está abaixo do ideal para um modelo robusto, onde o valor seria o mais próximo de 100%. Estas informações podem ser vistas na Figura 5.29 o valor de F_{value} , utilizado para determinar se uma variável independente possui efeito significativo sobre a variável resposta, apresentou-se superior a 0,05 para todas as variáveis analisadas. Este resultado indica que todas as variáveis independentes incluídas neste estudo exercem influência significativa sobre a variável resposta.

Response Surface Design Analysis (03/01/2024 00:16:07)

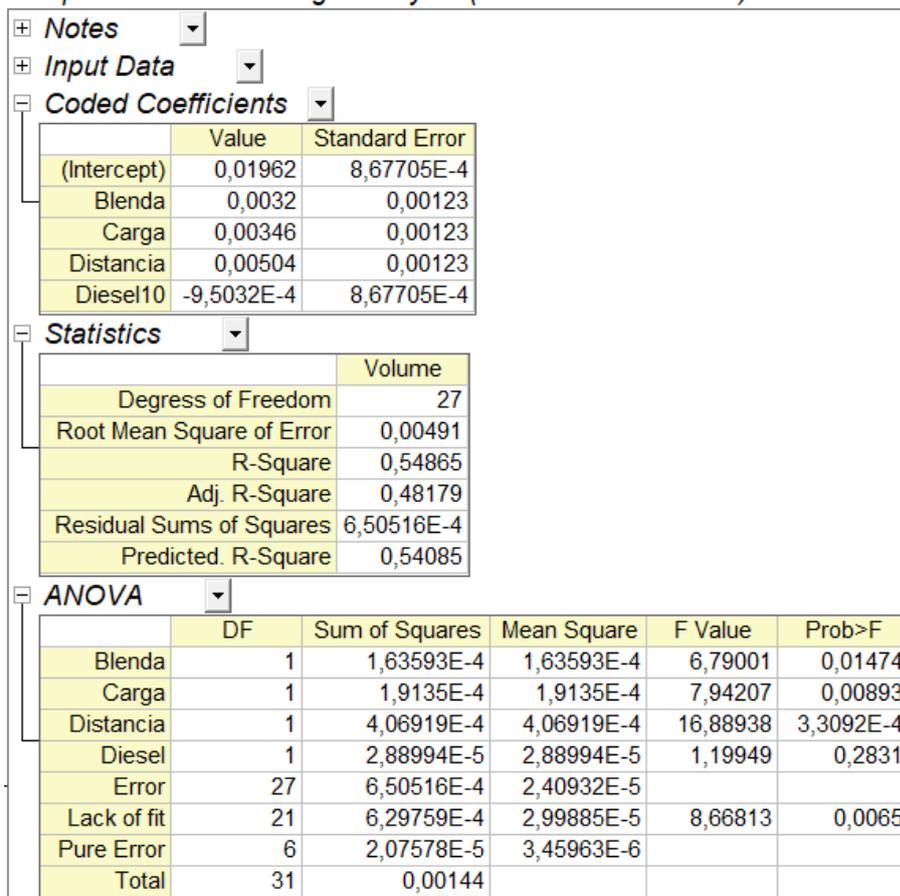


Figura 5.29. Resultados da superfície de respostas do DOE, para os resultados dos volumes desgastados.

A Figura 5.30 revela que todas as variáveis independentes exercem influência positiva na resposta do volume desgastado. A variável que apresentou o maior impacto foi a distância percorrida, cujo gráfico demonstra a inclinação positiva mais acentuada. Isso significa que, à medida que a distância aumenta, o volume desgastado também aumenta.

É importante destacar que o comportamento das variáveis distância percorrida e diesel neste gráfico se distingue do observado no Main Effect Plot da resposta do valor do COF. No caso do volume desgastado, a distância exerce influência positiva, devido possivelmente ao tempo de exposição da amostra durante a análise. A variável diesel também teve influência positiva. Nesse sentido, o diesel S500 apresentou um efeito mais expressivo quando comparado ao S10.

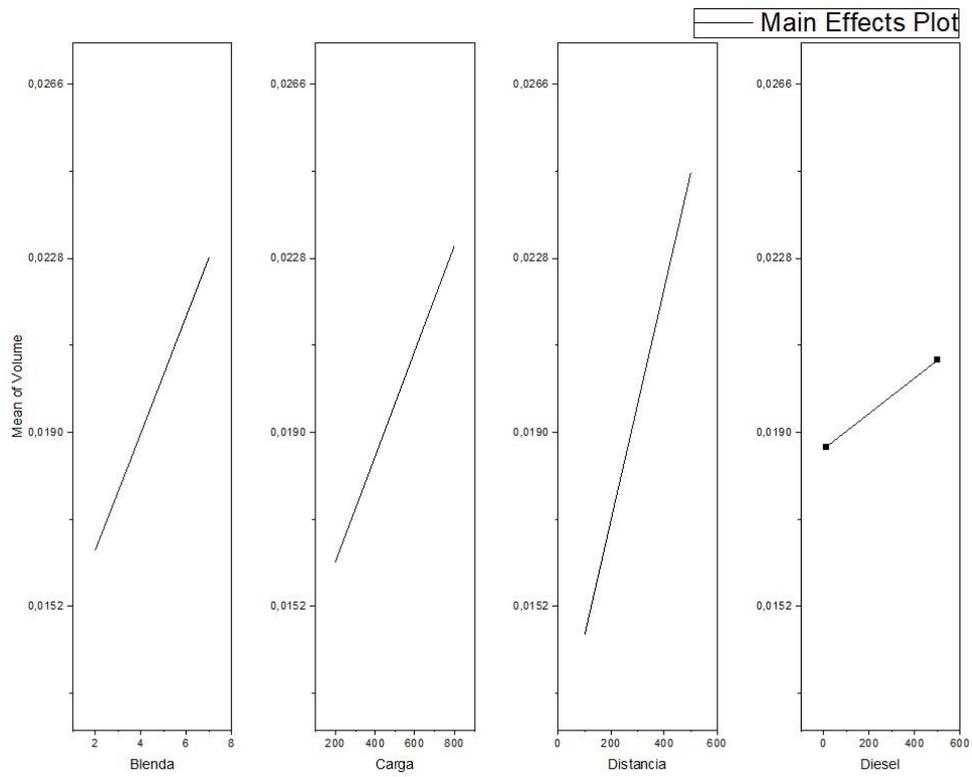


Figura 5.30. Main Effect Plot em função da variável volume desgastado.

6. CONCLUSÕES

A metodologia empregada neste trabalho se mostrou satisfatória em comparação com as formas convencionais de análise de combustíveis. O uso do coeficiente de atrito (COF) como forma de avaliar o desempenho tribológico dos combustíveis foi eficaz, permitindo concluir que:

- A carga aplicada tem uma forte correlação com o valor do COF, ou seja, quanto maior a carga, maior o valor do COF;
- As blendas com maior percentual de etanol tendem a apresentar um valor de COF mais elevado, o que pode ser explicado pela menor viscosidade e lubricidade do etanol em comparação o combustível diesel;
- Ao analisar as mesmas variáveis, não se observaram diferenças significativas nos resultados obtidos com o diesel S10 e S500, indicando similaridade no comportamento de ambos os combustíveis;
- As análises das superfícies desgastadas por MEV revelaram que o desgaste se manifestou predominantemente por mecanismos de abrasão. Nas amostras sob carga mais elevada, o desgaste abrasivo foi mais intenso, com maior geração de debris e formação de escara de dimensões superiores em comparação aos ensaios com carga inferior.

Os resultados obtidos neste trabalho demonstram que a metodologia proposta é eficaz para avaliar o desempenho tribológico de combustíveis. As blendas com maior percentual de etanol apresentaram um COF mais elevado,

7. PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS

Para aprofundar os conhecimentos sobre o tema abordado neste trabalho, propõem-se as seguintes pesquisas futuras:

- Análise da subsuperfície de desgaste por técnica de microscopia de força atômica (AFM) e Rahman;
- Avaliar as propriedades físico-químicas das blendas para correlacionar com a viscosidade;
- Investigar métodos de análise de desgaste complementares ao HFRR da ASTM G-133, como o teste Pino sobre Disco da ASTM G-99;
- Analisar o volume desgastado sob distintas variáveis e configurações experimentais.
- Analisar a resistência ao desgaste de distintos materiais em diferentes cenários.
- Avaliar a influência da temperatura no coeficiente de atrito.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AIE. **Perspectivas do Mercado Global de Petróleo**. 2023. Disponível em: www.iea.org. Acesso em janeiro de 2024.
- Alves, M. A., & Carvalho, M. A. **Life cycle assessment of biodiesel from soybean oil in Brazil**. *Journal of Cleaner Production*, (2022).
- ANP. **Resolução ANP nº 65 de 09/11/2011**. Disponível em: www.gov.br. Acesso em junho de 2022.
- ANP. **Resolução ANP nº 820 de 17/03/2023**. Disponível em: www.gov.br. Acesso em junho de 2024.
- ASM Internacional. **Surface Engineering for Corrosion and Wear Resistance**. ASM Internacional. 2001.
- ASM HANDBOOK. **Friction, lubrication, and wear technology**. Vol. 18. ASM International, EUA, 1992.
- ASTM A 295 – 98. **Standard Specification for High-Carbon Anti-Friction Bearing Steel**. 1998. ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959. United States.
- ASTM D 7755 – 11 **Standard Practice for Determining the Wear Volume on Standard Test Pieces Used by High-Frequency, Linear-Oscillation (SRV) Test Machine**. 2011. ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959. United States.
- ASTM E 18 – 22 **Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials**. 2022. ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959. United States.

- BIODIESELBR (Brasil) **A validação do B10 pelas montadoras.** [S. l.], 20 out. 2016
Disponível em: <https://www.biodieselbr.com/noticias/eventos/a-validacao-do-b10-pelas-montadoras>. Acesso em: 13 de setembro, 2022.
- BLAU, Peter J, **Friction science and technology: from concepts to applications.**
P. 51, CRC press, 2008.
- BOSCH, R. **Manual de Tecnologia Automotiva.** 25a ed. São Paulo: E. Blucher. 2005.
1232 p.
- BRASIL, Ministério da Ciência e Tecnologia. **Testes e Ensaios para Validação do Uso da Mistura Biodiesel B5 em Motores e Veículos.** Secretaria de Desenvolvimento Tecnológico e Inovação. Brasília, 175 p., 2009.
- BHUSHAN, Bharat; **Introduction to Tribology.** John Wiley & Sons: New York, 732 p., 2002.
- CHACARTEGUI C, Lopez J, Alfonso F, Aakko P, Hamelinck C, Vossen G, et al. **Mistura de etanol no diesel.** Relatório final do Lote 3b do projeto de Melhoria de Padrões de Biodiesel, Coordenação de Produtores e Estudos de Etanol (Bioscópios); Maio de 2007.
- CONSTANTINE, D.A.; WANG, Y; TERRELL, E.J. Effect of reciprocation frequency on friction and wear of vibrating contacts lubricated with soybean-based B100 biodiesel. **Tribology Letters**, v. 50, 2013, pp. 279–285.
- CUNHA, M.E. **Caracterização de Biodiesel Produzido com Misturas Binárias de Sebo Bovino, Óleo de Frango e Óleo de Soja.** 2008. 86 f. Dissertação (Mestrado em Química), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Química, Porto Alegre, 2008.
- EPE. **Relatório Descarbonização do Setor de Transporte Rodoviário Intensidade de carbono das fontes de energia.** 2022. Disponível em: www.epe.gov.br. Acesso em janeiro de 2024.
- FANG, Q.; FANG, J.; ZHUANG, J.; HUANG, Z. **Effects of Ethanol-Diesel-Biodiesel Blends on Combustion and Emissions in Premixed Low Temperature Combustion.** Applied Thermal Engineering, v. 54, p. 541-548, 2013.

- FARIAS, A.C.M. **Análise da lubricidade do biodiesel brasileiro de ésteres etílicos de soja e girassol**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, RN, Brasil, 2011.
- FARIAS, A.C.M de. et. al. **Os Combustíveis Verdes do Brasil – Avaliação da lubricidade do biodiesel B5 e óleos de mamona e coco**. Holos, Natal, v.3, Ano 27, 2011.
- J.E. Shigley, Richard G. Budynas, McGraw-Hil. **Fundamentals of Machine Component Design**. 2016, Capítulo 13: Lubrificação de Mancais.
- KUEHL, ROBERT. **Design of Experiments: Statistical Principles of Research Design and Analysis**. Hardcover, 1999.
- GERDES, K. R.; SUPPES, G. J. **Miscibility of Ethanol in Diesel Fuels**. Industrial Engineering Chemical Resources, vol. 40, p. 949-956, 2001.
- GODET, M. Third-bodies in tribology. **Wear**, v. 136, nº1, 1990, pp. 29–45.
- HANSEN AC, Lyne PWL. **Misturas etanol-diesel: um passo em direção a um combustível de base biológica para motores a diesel**. Paper ASAE 01-6048; 2001.
- HASEEB, A.S.M.A.; SIA, S.Y.; FAZAL, M.A.; MASJUKI, H.H. Effect of temperature on tribological properties of palm biodiesel. **Energy**, v. 35, 2010, pp. 1460–1464.
- HUTCHINGS, I.M. **Tribology - Friction and Wear of Engineering Materials**. Cambridge: British Library Cataloguing in Publication Data, 1992.
- HUTCHING, I. Tribology (Second Edition) - **Friction and Wear of Engineering Materials**. Published by Elsevier Ltd. 2017, Pages 79-105.
- IPEA, **Emissões Relativas de Poluentes do Transporte Motorizado de Passageiros nos Grandes Centros Urbanos Brasileiros**. 1606 – Texto para Discussão. Carlos Henrique Ribeiro de Carvalho, Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, 2011.
- ISO 12156. Diesel fuel – **Assessment of lubricity using the high-frequency reciprocating rig(HFRR)** – Part 1: Test method. 2006. Disponível em http://www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm?csnumber=39783. Acesso em: 1 Agosto 2022.

- Jaber Abu Qudeiri, Mohammad Jawad Khalifeh Título: **Caracterização Tribológica de Revestimentos Compósitos de Alumínio** .Fonte: International Journal of Tribology, v. 5, n. 2, pág. 38-41, 2019.
- JOAQUIM, C. R. O. **Verificação do Comportamento da Lubricidade do Óleo Diesel Veicular com Adição de Etanol**. 2007. 103 f. Dissertação (mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo – SP, 2007.
- KATO, K. A, ADACHI, K. **Wear Mechanism: Modern Tribology Handbook**. Vol. 1., New York: CRC Press, 2001. p. 291-301.
- KNOTHE, G.; Van Gerpen, J.; Krahl, J.; Ramos, L.P. **Manual do Biodiesel**. São Paulo: Edgard-Blücher, 340 p, 2006.
- KUO, W.F., CHIOU, Y.C., LEE, R.T., **A study on lubrication mechanism and wear scar in sliding circular contacts**. Wear, v. 201, p. 217-226, dez. 1996.
- LANE, J.C. **Gasoline and Other Motor Fuel**, em Kirk-Othmer, Encyclopedia of Chemical Technology, 3rd ed, Vol.11. John Wiley e Sons, NY, 1980.
- LIMA DA SILVA, R. C. **Desgaste de polímeros estruturados de engenharia em contato de deslizamento com cilindro metálico**. 2010. 183f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2010.
- MARU, M.M; TROMMER, R.M.; CAVALCANTI, K.F.; FIGUEIREDO, E.S.; SILVA, R.F.; ACHETE, C.A. The Stribeck curve as a suitable characterization method of the lubricity of biodiesel and diesel blends. **Energy**, v. 69, 2014, pp. 673–681.
- MATTOS, C.V.L. de. **Estudo da Correlação das propriedades do Diesel, Biodiesel e suas Blendas com a Lubricidade**. Porto Alegre. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Brasil.
- MIER, J.C. (2014) **Aços e Ligas Metálicas**. Editora Edgard Blücher.
- MONTGOMERY, D. C. (2013). **Design and analysis of experiments**.
- MURO, A.J. **Política Nacional de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores**. IFG, 2014
- NAVES, E.D (2016) **Mecânica do contato entre corpos revestidos**. Editora Edgard Blücher.

- NICOLAU, A.; LUTCKMEIER, C.V.; SAMIOSA, D.; GUTTERRESC, M.; PIATNICKB, C.M.S. **The relation between lubricity and electrical properties of low sulfur diesel and diesel/biodiesel blends.** Fuel, v. 117, p. 26–32, 2014.
- NIGRO, F. E. B. **Considerações sobre o uso de misturas álcool-diesel.** Relatório Técnico, 1998, São Paulo. Não publicado.
- NORTON, R. **Projeto de Máquinas.** 2 ed. Porto Alegre: Bookman, 2004. p. 409 –428. 2004
- OLIVEIRA, F.C.C.; SAUREZ, P.A.Z.; SANTOS, W.L.P. Biodiesel: Possibilidades e 157 Desafios. **Química Nova na Escola**, n. 28, p.3-8, maio 2008.
- OLIVEIRA FILHO, M.F. – **Análise da sensibilidade do biodiesel B5 em motores diesel.** Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Dissertação de Mestrado. Natal, RN, 2011, 111p.
- ONU. **Relatório Mundial de Mobilidade Urbana.** 2022. Disponível em: www.relatorio-anual-2022.netlify.app. Acesso em janeiro de 2024.
- ORTEGA, M. R. V. **Comportamento quanto à corrosão e efeito lubrificante de líquidos iônicos pórticos.** 2014. 109 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2014.
- PANTALEON, E.M. **Modelo de desgaste oxidativo baseado em parâmetros termodinâmicos.** São Paulo, 2004. Teses de Doutorado – Escola Politecnica - Universidade São Paulo, 2004.
- PNUMA, **Relatório de Emissões Mundiais de Gases de Efeito Estufa.** 2020. Disponível em: < www.unep.org>. Acesso em janeiro de 2024.
- POSSIDONIO, E.R. **Otimização das condições de síntese de biodiesel de óleo de soja, visando atender às normas de qualidade da ANP.** Trabalho de Conclusão. Botucatu, 2008.
- QUEIROGA, KAYO FELIPE NUNES MAIA DE. **Tribologia.** Universidade Potiguar – UNP. Cst Em Petróleo e Gás – p. 7-9. Junho, 2010. <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAA4GYAF/tribologia>. Acesso em: 01/2024.
- RA García-Leon´a; J. Martínez-Trinidad, R. Zepeda-Bautista, I; Campos-Silva; A. Guevara-Morales; J. Martínez-Londono; J. B arbosa-Saldana. **Ensaio de desgaste**

por deslizamento a seco em aço inoxidável ASTM 316L boretado sob configuração esfera-plana: uma análise estatística. Instituto Politécnico Nacional, Cidade do México, 2021.

RABINOWICZ, E. **Friction, Lubrication and Wear Technology**, Elsevier 2014.

RFA. **Renewable Fuels Association**. Disponível em: <http://ethanolrfa.org/>. Acesso em Junho de 2022.

SANTOS, S. A.; VALLE, M. L. M.; GIANNINI, R. G. **A experiência brasileira no desenvolvimento de um combustível binário álcool-diesel.** Economia & Energia, Belo Horizonte, 01 maio 2000.

SANTOS, R. M. **EFEITO DA CONTAMINAÇÃO DO ÓLEO LUBRIFICANTE POR COMBUSTÍVEIS NA LUBRIFICAÇÃO PARA MOTORES FLEX.** Universidade federal do rio grande do norte centro de tecnologia programa de pós-graduação em engenharia mecânica, (2018)

SILVA JUNIRO, E. M. **Estudo e monitoração de parâmetros tribológicos e de desempenho em motores Diesel bicomustível.** Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, RN, 2014.

SILVESTRE, A. B. **Comportamento Tribológico de Superfícies Metálicas Nanotexturadas com Lasers de Femtosegundo.** Dissertação (Mestrado em Engenharia). O Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa. Lisboa, 2017.

SOUZA, G. de. **Impactos da adição de Biodiesel no motor Diesel.** Araçatuba. 2010. Trabalho de conclusão de Curso (Tecnologia em Biocombustíveis). Faculdade de Tecnologia de Araçatuba. Brasil.

STACHOWIAK, Gwidon W.; Batchelor, Andrew W. **Engineering Tribology**. 2.ed. Butterworth-Heinemann: Boston, 744 p., 2001.

STACHOWIAK, G.W.; BATCHELOR, A.W. **Engineering tribology: Tribologia**. 2aed. Butterworth Heinemann, Boston, p. 504-570; 872, 2014.

STACHOWIAK, G.W.; BATCHELOR, A.W. **Engineering Tribology**. 3.ed. New York: Elsevier, 2005.

STOETERAU, R. L. **Apostila de Tribologia**. Departamento de Engenharia Mecânica- Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.

- SULEK, M.W.; KULCZYCKI, A.; MALYSA, A. **Assessment of lubricity of compositions of fuel oil with biocomponents derived from rape-seed.** Wear, v. 268, 2010, pp. 104–108.
- TEIXEIRA, K., **Influência da Velocidade de Deslizamento no Desgaste do Par Tribológico Ferro Fundido Cinzento (MC 12 e MC 13) – Ferro Fundido Cinzento Centrifugado.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Estadual Paulista (UNESP). 2011. 33-53p.
- ÚNICA. **Etanol uma atitude inteligente.** 2008. Disponível em: <https://brt.ifsp.edu.br/phocadownload/userupload/213354/IFMAN170005%20CAN%20DE%20ACAR%20A%20PRODUO%20DE%20ETANOL%20E%20SEUS%20BENEFICIOS.pdf> Acesso em: 28 Fevereiro 2023.
- YANOWITZ, J, RATCLIFF, M.A, MCCORMICK, R.L, TAYLOR, J.D, MURPHY, M.J. **Compendium of experimental cetane numbers:** Based on the Compendium of Experimental Cetane Numbers, NREL/TP-5400-61693, August 2014.
- ZHIQING, JIANGTAO, JIE. **Performance, combustion and emission characteristics investigations on a diesel engine fueled with diesel/ ethanol /n-butanol blends.** 2022



Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul
Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Av. Ipiranga, 6681 – Prédio 1 – Térreo
Porto Alegre – RS – Brasil
Fone: (51) 3320-3513
E-mail: propesq@pucrs.br
Site: www.pucrs.br