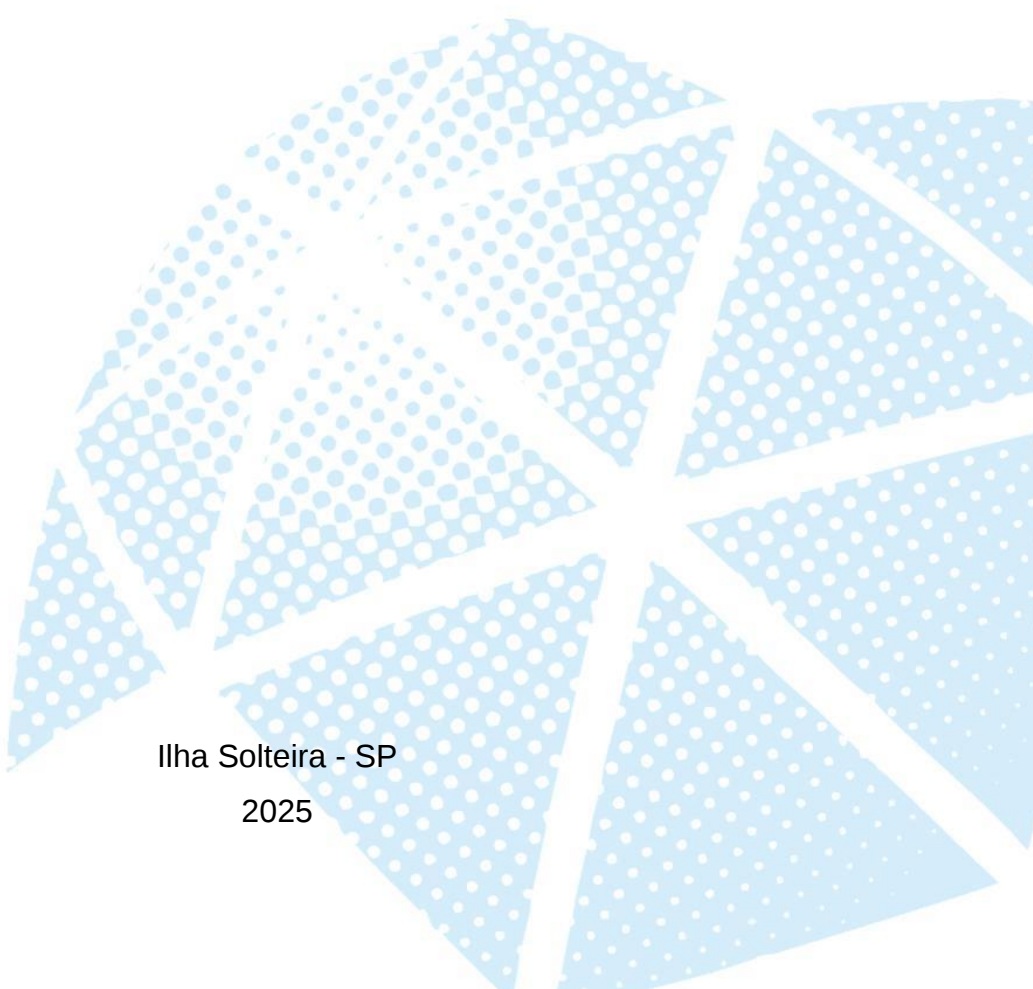


**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

CARLINÉIA MARCIANA DOS SANTOS PEREIRA

**EFEITOS DA ADIÇÃO DE NANOPARTÍCULAS DE ÓXIDO DE ZINCO E ÓXIDO
DE ZINCO DOPADO COM MOLIBDÊNIO, EM ÓLEOS MINERAL E VEGETAIS:
ANÁLISE NAS PROPRIEDADES TRIBOLÓGICAS DE SUPERFÍCIE DE
CONTATO**

Ilha Solteira - SP
2025



CARLINÉIA MARCIANA DOS SANTOS PEREIRA

**EFEITOS DA ADIÇÃO DE NANOPARTÍCULAS DE ÓXIDO DE ZINCO E ÓXIDO
DE ZINCO DOPADO COM MOLIBDÊNIO, EM ÓLEOS MINERAL E VEGETAIS:
ANÁLISE NAS PROPRIEDADES TRIBOLÓGICAS DE SUPERFÍCIE DE
CONTATO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP, como parte dos pré-requisitos necessários para a obtenção do título de Mestra em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador(a): Prof. Dr. Aparecido Carlos Gonçalves

Ilha Solteira - SP

2025

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvida pela Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação

- P436e Pereira, Carlinéia Marciana dos Santos.
Efeitos da adição de nanopartículas de óxido de zinco e óxido de zinco dopado com molibdênio, em óleos mineral e vegetais: análise nas propriedades tribológicas de superfície de contato / Carlinéia Marciana dos Santos Pereira. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2025
118 f. : il.
- Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Materiais e Processos de Fabricação, 2025
- Orientador: Aparecido Carlos Gonçalves
Inclui bibliografia
1. Nanopartículas em lubrificantes. 2. Desgaste. 3. Superfície de contato. 4. Lubrificantes.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: EFEITOS DA ADIÇÃO DE NANOPARTÍCULAS DE ÓXIDO DE ZINCO E ÓXIDO DE ZINCO DOPADO DE MOLIBDÊNIO EM ÓLEOS MINERAL E VEGETAIS: ANÁLISE NAS PROPRIEDADES TRIBOLÓGICAS DE SUPERFÍCIE DE CONTATO

AUTORA: CARLINEIA MARCIANA DOS SANTOS PEREIRA

ORIENTADOR: APARECIDO CARLOS GONCALVES

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em Engenharia Mecânica, área: Materiais e Processos de Fabricação pela Comissão Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **APARECIDO CARLOS GONCALVES**
Data: 09/04/2025 17:34:11-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. APARECIDO CARLOS GONCALVES (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Documento assinado digitalmente
 **JOSE GEDAEI FAGUNDES JUNIOR**
Data: 09/04/2025 13:57:46-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. JOSÉ GEDAEI FAGUNDES JUNIOR (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Documento assinado digitalmente
 **JUSSARA APARECIDA DE OLIVEIRA COTTA**
Data: 09/04/2025 14:31:06-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Profa. Dra. JUSSARA APARECIDA DE OLIVEIRA COTTA (Participação Virtual)
Departamento de Ciências Exatas / Universidade do Estado de Minas Gerais - UEMG

Ilha Solteira, 09 de abril de 2025

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

Esta pesquisa tem o potencial de impactar a sociedade de maneira significativa ao promover avanços científicos e técnicos na tribologia, desenvolvendo lubrificantes mais eficientes e sustentáveis com nanopartículas de MoO_3 e ZnO . Isso pode reduzir o desgaste de máquinas, prolongar sua vida útil e diminuir custos de manutenção, beneficiando setores industriais como automotivo e de energia. Ao substituir óleos minerais por alternativas vegetais, o estudo apoia práticas ambientalmente responsáveis, impulsionando o desenvolvimento econômico sustentável. Além disso, a pesquisa contribui para o conhecimento educacional e científico, incentivando a internacionalização e colaborando com soluções inovadoras em nível local e global.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

This research has the potential to significantly impact society by promoting scientific and technical advancements in tribology, developing more efficient and sustainable lubricants with MoO_3 and ZnO nanoparticles. This can reduce machine wear, extend their lifespan, and lower maintenance costs, benefiting industrial sectors such as automotive and energy. By replacing mineral oils with vegetable alternatives, the study supports environmentally responsible practices, driving sustainable economic development. Furthermore, the research contributes to educational and scientific knowledge, fostering international collaboration and offering innovative solutions at local and global levels.

Dedico este trabalho aos meus pais,
Geni e Luiz, pelo apoio, esforço e
amor incondicionais a mim dedicados.
Aos meus irmãos e sobrinhos por
sonharem ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, por me dar força e me ajudar em todos os momentos difíceis e por ter permitido que eu tivesse saúde e dedicação para a realização deste trabalho. A ele dedico todos meus esforços e conquistas.

Agradeço aos meus pais, Luiz e Geni, pelo apoio incondicional e por sempre estarem ao meu lado para ajudar em toda e qualquer dificuldade, e por não me deixarem desistir do meu sonho no meio do caminho, e à toda minha família.

Ao meu professor orientador, Doutor Aparecido Carlos Gonçalves, pela confiança depositada em mim e pelo conhecimento compartilhado para este trabalho acontecer.

Ao professor Doutor José Gedael Fagundes Junior, por ter me apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e por seu incentivo ao longo dessa jornada.

Ao professor Doutor Erickson Fabiano Moura Souza Silva, pela doação das nanopartículas e lubrificantes vegetais utilizado nos ensaios laboratoriais e pelas constantes conversas de apoio e incentivo na jornada acadêmica.

Ao Laboratório de Projetos Mecânicos e Tribologia da Universidade de Santa Cruz (UESC), pela realização dos ensaios de dureza.

Aos meus colegas de laboratório e amigos, Victor Hokazono e Wilker Luz que compartilharam comigo muitos momentos de desafios e frustrações. Deixo meus mais sinceros agradecimentos também aos amigos que Ilha Solteira me proporcionou.

E, por fim, em especial gostaria de agradecer também ao meu namorado, Tiago Santana, pelo companheirismo, pela compreensão e pelo apoio incondicional durante toda essa trajetória. Sua presença foi essencial nos momentos mais desafiadores e sua confiança no meu potencial me deu forças para seguir em frente.

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

“Não há saber mais ou saber menos: há saberes diferentes.” Paulo Freire

RESUMO

Com o avanço das indústrias e a crescente demanda por soluções inovadoras que aliam tecnologia, eficiência e sustentabilidade, a pesquisa em biolubrificantes tem ganhado destaque. Nesse contexto, a tribologia desempenha um papel fundamental na lubrificação, redução do atrito e do desgaste em sistemas mecânicos, otimizando o desempenho dos componentes. A incorporação de nanopartículas funcionais surge como uma estratégia promissora para aprimorar as propriedades tribológicas dos lubrificantes e mitigar os processos de degradação dos materiais em contato. Este trabalho investiga os efeitos da adição de nanopartículas de óxido de zinco (ZnO) e óxido de zinco dopado com molibdênio (ZnO/MoO₃) em lubrificantes minerais e vegetais, avaliando seu impacto no desempenho tribológico das superfícies de contato. Para atingir esse objetivo, foram realizados ensaios experimentais e análises complementares, incluindo testes de viscosidade, ensaios de atrito e desgaste com um tribômetro Pin-on-Disk, análise do índice de partículas ferrosas e ferrografia analítica. Também foram utilizadas técnicas avançadas, como microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia, para investigar as interações físicas e químicas envolvidas. Os resultados demonstram que a adição das nanopartículas reduz significativamente o coeficiente de atrito e o desgaste, melhorando a lubrificação e a proteção das superfícies de contato. Esse efeito tribológico está associado à formação de uma camada protetora, contribuindo para a diminuição da perda de material. Além disso, a presença das nanopartículas levou à redução de partículas ferrosas nos lubrificantes, evidenciando sua eficácia na mitigação do desgaste e na preservação da integridade dos componentes mecânicos. Essas descobertas evidenciam o potencial das nanopartículas como aditivos lubrificantes, possibilitando o desenvolvimento de formulações mais eficientes e sustentáveis para aplicações industriais. A pesquisa reforça o potencial dos nanomateriais na engenharia tribológica e aponta para novas perspectivas no desenvolvimento de lubrificantes de alto desempenho, impulsionando avanços significativos na otimização de sistemas mecânicos e na redução dos impactos ambientais.

Palavras - chaves: nanopartículas em lubrificantes; desgaste; superfície de contato; lubrificantes.

ABSTRACT

With the advancement of industries and the growing demand for innovative solutions that integrate technology, efficiency, and sustainability, research on biolubricants has gained prominence. In this context, tribology plays a fundamental role in lubrication, friction reduction, and wear mitigation in mechanical systems, optimizing component performance. The incorporation of functional nanoparticles has emerged as a promising strategy to enhance the tribological properties of lubricants and mitigate material degradation processes in contact surfaces. This study investigates the effects of adding zinc oxide (ZnO) and molybdenum-doped zinc oxide (ZnO/MoO₃) nanoparticles to mineral and vegetable lubricants, assessing their impact on the tribological performance of contact surfaces. To achieve this objective, experimental tests and complementary analyses were conducted, including viscosity measurements, friction and wear tests using a Pin-on-Disk tribometer, ferrous particle index analysis, and analytical ferrography. Advanced techniques such as scanning electron microscopy (SEM) and spectroscopy were also employed to investigate the physical and chemical interactions involved. The results demonstrate that the addition of nanoparticles significantly reduces the coefficient of friction and wear, improving lubrication and protecting contact surfaces. This tribological effect is associated with the formation of a protective layer, which contributes to reducing material loss. Furthermore, the presence of nanoparticles led to a reduction in ferrous debris in the lubricants, highlighting their effectiveness in mitigating wear and preserving the integrity of mechanical components. These findings underscore the potential of nanoparticles as lubricant additives, enabling the development of more efficient and sustainable formulations for industrial applications. This research reinforces the potential of nanomaterials in tribological engineering and points to new perspectives in the development of high-performance lubricants, driving significant advancements in the optimization of mechanical systems and the reduction of environmental impacts.

Keywords: nanoparticles in lubricants; wear; contact surface; lubricants.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Lubrificante PNM 55 utilizado.....	28
Figura 2: Árvore de origem do óleo e o óleo extraído.	31
Figura 3: Sementes de origem do óleo e o óleo extraído.....	33
Figura 4: Determinação do Índice de Viscosidade	44
Figura 5: Procedimento Metodológico.....	45
Figura 6: Corpos de Provas: discos e esferas.....	46
Figura 7: Etapas dos Ensaio Preliminares.....	48
Figura 8: Equipamento de medição de rugosidade.	49
Figura 9: Instrumentação na determinação da densidade.	51
Figura 10: Equipamento Viscosímetro Saybolt.....	51
Figura 11: Espectrômetro FuiScan 1000 oil.	53
Figura 12: Instrumentação para análise de caracterização.....	55
Figura 13: Preparação e banho de ouro das nanopartículas.	55
Figura 14: Sistema de rotação do Pin-On-Disk.	57
Figura 15: Bancada experimental <i>Pin-On-Disk</i>	58
Figura 16: Trilha de desgaste Pin-On-Disk.....	59
Figura 17: Pós ensaios tribológicos.....	60
Figura 18: Espectrômetro de raio X(DRX).....	61
Figura 19: Preparação para ensaio de espectrometria.	61
Figura 20: Monitor de partículas ferrosas.	62
Figura 21: Amostras dos Lubrificantes pós – ensaio.....	63
Figura 22: Depositador rotativo de partículas.....	64
Figura 23: Anéis do ferrograma obtidos.	65
Figura 24: Ferrosópio Olympus BX-41	66
Figura 25: Sistema de filtragem de membrana.....	67
Figura 26: Análise morfológica da NPs de ZnO.	74
Figura 27: Histograma de análise quantitativa de NPs de ZnO.....	75
Figura 28: Análise de EDS de NPs de ZnO.....	75
Figura 29: Análise morfológica da NPs de ZnO/MoO ₃	76
Figura 30: Histograma de análise quantitativa de NPs de ZnO/MoO ₃	77
Figura 31: Análise de EDS de NPs de ZnO/MoO ₃	77

Figura 32: Variação do coeficiente de atrito com relação ao tempo de ensaio do par tribológico Latão x Aço.	78
Figura 33: Variação do coeficiente de atrito com relação ao tempo de ensaio do par tribológico Aço x Aço.	79
Figura 34: Variação do coeficiente de atrito com relação ao tempo de ensaio do par tribológico Latão x Aço.	81
Figura 35: Variação do coeficiente de atrito com relação ao tempo de ensaio do par tribológico Aço x Aço.	82
Figura 36: Variação do coeficiente de atrito com relação ao tempo de ensaio do par tribológico Latão x Aço.	83
Figura 37: Variação do coeficiente de atrito com relação ao tempo de ensaio do par tribológico Aço x Aço.	84
Figura 38: Quantificação de partículas presente no lubrificante de mamona puro.	90
Figura 39: Quantificação de partículas presente no lubrificante de mamona com par tribológico Latão x Aço.	91
Figura 40: Quantificação de partículas presente no lubrificante de mamona com par tribológico Aço x Aço.	91
Figura 41: Quantificação de partículas presente no lubrificante de urucum puro.	93
Figura 42: Quantificação de partículas presente no lubrificante de urucum com par tribológico Latão x Aço.	94
Figura 43: Quantificação de partículas presente no lubrificante de urucum com par tribológico aço x aço.	95
Figura 44: Quantificação de partículas presente no lubrificante de PNM55 puro.	96
Figura 45: Quantificação de partículas presente no lubrificante de PNM55 com par tribológico Latão x Aço.	97
Figura 46: Quantificação de partículas presente no lubrificante de PNM55 com par tribológico Aço x Aço.	98
Figura 47: Índice de PQ dos ensaios com os lubrificantes de mamona com par tribológico Latão x Aço.	99
Figura 48: Índice de PQ dos ensaios com os lubrificantes de mamona com par tribológico Aço x Aço.	100
Figura 49: Índice de PQ dos ensaios com os lubrificantes de urucum com par tribológico Latão x Aço.	100

Figura 50: Índice de PQ dos ensaios com os lubrificantes de urucum com par tribológico Aço x Aço.....	101
Figura 51: Índice de PQ dos ensaios com os lubrificantes mineral PNM55 com par tribológico Latão x Aço.	101
Figura 52: Índice de PQ dos ensaios com os lubrificantes mineral PNM55 com par tribológico Aço x Aço.....	102
Figura 53: Ferrografia analítica das amostras de par tribológico Latão x Aço.....	104
Figura 54: Ferrografia analítica das amostras de par tribológico Aço x Aço.	104
Figura 55: Ferrografia analítica das amostras de par tribológico Latão x Aço.....	105
Figura 56: Ferrografia analítica das amostras de par tribológico Aço x Aço.	106
Figura 57: Ferrografia analítica das amostras de par tribológico Latão x Aço.....	107
Figura 58: Ferrografia analítica das amostras de par tribológico Aço x Aço.	108

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Propriedades mecânicas dos materiais utilizados.....	46
Tabela 2: Classificação e nomenclatura dos ensaios.....	47
Tabela 3: Tipos de Lubrificantes Vegetais.	52
Tabela 4: Especificações Operacionais dos Ensaios Tribológicos.....	56
Tabela 5: Apresentação de resultados.....	68
Tabela 6: Medições de rugosidade superficial.	69
Tabela 7: Medições de dureza Vickers.	69
Tabela 8: Massa de óleos lubrificantes e aditivos.	70
Tabela 9: Viscosidades dos lubrificantes ensaiados.	71
Tabela 10: Densidade dos lubrificantes ensaiados.	72
Tabela 11: Resultados de FTIR e de partículas de água nos lubrificantes sem adição de nanopartículas.....	73
Tabela 12: Variação da Massa dos Corpos de Prova Utilizando Lubrificante de Mamona.	86
Tabela 13: Variação da Massa dos Corpos de Prova Utilizando lubrificante de Urucum.	87
Tabela 14: Variação da Massa dos Corpos de Prova Utilizando lubrificante PNM55.	88
Tabela 15: Determinação de tamanhos de partículas.	103

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

API	<i>American Petroleum Institute</i> - Instituto americano de petróleo
°C	Graus celsius
cm	Centímetro
Cu	Cobre
cSt	<i>centistockes</i>
EDS	Espectroscopia por energia dispersiva
EP	Extrema pressão
Fe	Ferro
g	grama
HRB	Dureza de Brinell
I ₂	Iodo
IV	Índice de viscosidade
kg	Kilograma
Mg	Magnésio
m	Metro
Mo	Molibidênio
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
MoS ₂	Disulfeto de molibdênio
MoO ₃	Óxido de molibdênio
N	Newton
P	Fósforo
Pa	Pascal
PAOs	Polialfaolefinas
PQA	Monitor de partículas ferrosas
PQI	Índice de partículas ferrosas
PTFE	Politetra-flúor-etileno
Ra	Rugosidade média aritmética
RPD	Depositador rotativo de partículas
Rq	Rugosidade média quadrática
Ry	Altura máxima de perfil
Rz	Rugosidade total
s	Segundos

S	Enxofre
Sn	Estanho
SO ₂	Dióxido de enxofre
SSU	<i>Saybolt Universal</i>
ZDDP	Ditiofosfato de zinco
Zn	Zinco
ZnO	Óxido de zinco
ZnO/ MoO ₃	Óxido de zinco dopado de molibdênio

LISTA DE SÍMBOLOS

μ	Coeficiente de atrito
F_{at}	Força de atrito
F_N	Força normal
τ	Tensão de cisalhamento
η	Viscosidade dinâmica
ν	Viscosidade cinemática
ρ	Massa específica
m	Massa de um objeto
V	Volume
μ_{cin}	Coeficiente de atrito cinético

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	OBJETIVO GERAL.....	22
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	22
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1	TRIBOLOGIA.....	23
2.1.1	Mecanismos de Lubrificação	24
2.1.1.1	Lubrificantes Gasosos	24
2.1.1.2	Lubrificantes Sólidos	24
2.1.1.3	Lubrificantes Semissólidos	25
2.1.1.4	Lubrificantes Líquidos	26
2.1.1.4.1	Óleos Básicos Minerais	26
2.1.1.4.1.1	Óleo Mineral PNM 55.....	27
2.1.1.4.2	Óleos Básicos Sintéticos	29
2.1.1.4.3	Óleos Básicos Vegetais	29
2.1.1.4.3.1	Óleo graxo de Mamona (<i>Ricinus communis</i> L.)	30
2.1.1.4.3.2	Óleo graxo de Urucum (<i>Bixa orellana</i> L.)	32
2.1.1.5	Aditivos tradicionalmente utilizados	34
2.1.1.6	Nanoaditivos	35
2.1.1.6.1	Óxido de Zinco (ZnO)	36
2.1.1.6.2	Óxido de Zinco dopado com Molibdênio (ZnO/MoO₃)	37
2.1.2	Atrito	38
2.1.3	Desgaste	39
2.1.4	Viscosidade	41
2.1.4.1	Índice de viscosidade	43
3	MATERIAIS E MÉTODOS	45
3.1	DETERMINAÇÃO DO CORPO DE PROVA E DOS LUBRIFICANTES ...	46

3.1.1	Material do corpo de prova.....	46
3.1.2	Definição dos Lubrificantes	47
3.2	ENSAIOS PREPARATÓRIOS.....	48
3.2.1	Par Tribológico	48
3.2.1.1	Rugosidade Superficial	49
3.2.1.2	Ensaio de Dureza	50
3.2.2	Lubrificantes	50
3.2.2.1	Densidade	50
3.2.2.2	Viscosidade e Índice de Viscosidade	51
	3.2.2.2.1.1 Índice de Viscosidade	52
3.2.2.3	Espectroscopia de infravermelho (FTIR)	53
3.2.3	Nanopartículas.....	54
3.2.3.1	Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	54
3.3	ENSAIO TRIBOLÓGICO	56
3.3.1	Condição de Operação	56
3.3.2	Ensaio de Tribômetro.....	57
3.4	PÓS ENSAIO TRIBOLÓGICO.....	59
3.4.1	Espectrometria de raio X (DRX)	60
3.4.2	Monitor de partículas ferrosas (PQA)	62
3.4.3	Depositor rotativo de partículas (RPD)	63
3.4.4	Filtragem por membrana celulósica	66
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	68
4.1	PROPRIEDADES DO PAR TRIBOLÓGICO	68
4.1.1	Rugosidade superficial	69
4.1.2	Dureza	69
4.2	CARACTERÍSTICAS DOS LUBRIFICANTES	70
4.2.1	Viscosidade	70

4.2.2	Densidade	71
4.2.3	Espectroscopia de infravermelho (FTIR).....	72
4.3	CARACTERIZAÇÃO DAS NANOPARTÍCULAS	73
4.3.1	Análise MEV/EDS das nanopartículas de ZnO.....	73
4.3.2	Análise MEV/EDS das nanopartículas de ZnO/MoO₃.....	76
4.4	DESEMPENHO DO ENSAIO TRIBOLÓGICO	78
4.4.1	Coeficiente de atrito	78
4.4.1.1	Análise de coeficiente de atrito dos lubrificantes de mamona.	78
4.4.1.2	Análise de coeficiente de atrito dos lubrificantes vegetais de urucum	81
4.4.1.3	Análise de coeficiente de atrito dos lubrificantes minerais PNM55	83
4.4.1.4	Análise comparativa de coeficiente de atrito dos lubrificantes ensaiados	85
4.4.2	Desgaste por variação de massa.....	85
4.4.2.1	Análise de variação de perda de massa utilizando o lubrificante de mamona.	86
4.4.2.2	Análise de variação de perda de massa utilizando o lubrificante de urucum.	87
4.4.2.3	Análise de variação de perda de massa utilizando o lubrificante PNM55.	88
4.4.2.4	Análise comparativa dos ensaios de perda de massa dos pares tribológicos	89
4.5	ANÁLISE DAS PARTÍCULAS DE DESGASTE – PÓS ENSAIO TRIBOLÓGICO	89
4.5.1	Espectrometria de raio X	89
4.5.1.1	Análise elementar dos lubrificantes de mamona por espectrometria de raio X.	90
4.5.1.2	Análise elementar dos lubrificantes de urucum por espectrometria de raios X.	93
4.5.1.3	Análise elementar dos lubrificantes de PNM55 por espectrometria de raios X	95
4.5.1.3.1	Análise comparativa da quantidade de partículas por raio X	98

4.5.2	Índice de PQ.....	98
4.5.2.1	Índice de PQ dos lubrificantes vegetais de mamona	99
4.5.2.2	Índice de PQ dos lubrificantes vegetais de urucum	100
4.5.2.3	Índice de PQ dos lubrificantes minerais de PNM55.	101
4.5.2.4	Análise comparativa dos índices de PQ.	102
4.5.3	Ferrografia analítica	103
4.5.3.1	Análise de ferrografia analítica do lubrificante vegetal de mamona	103
4.5.3.2	Análise de ferrografia analítica dos lubrificantes vegetais de urucum	105
4.5.3.3	Análise de ferrografia analítica dos lubrificantes minerais PNM55	107
4.5.3.3.1	<i>Análise comparativa de ferrografia analítica dos ensaios</i>	108
5	CONCLUSÃO	109
5.1	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	110
	REFERÊNCIAS.....	111

1 INTRODUÇÃO

A tribologia, ciência que estuda o atrito, a lubrificação e o desgaste, desempenha um papel essencial em diversas indústrias, incluindo os setores automotivo, aeroespacial e de energia. A eficiência dos sistemas mecânicos está diretamente relacionada à capacidade dos lubrificantes de reduzir o atrito e minimizar o desgaste entre superfícies em contato (Stachowiak e Batchelor, 2000; Mahad *et al.*, 2019). Tradicionalmente, óleos minerais têm sido amplamente utilizados devido à sua alta disponibilidade e boas propriedades tribológicas. No entanto, por serem derivados do petróleo, sua extração, refino e descarte geram impactos ambientais significativos, como a emissão de gases de efeito estufa e a contaminação de solos e recursos hídricos (Oliveira, 2013; Zainal, Zulkifli *et al.*, 2018).

Diante da crescente carência de recursos fósseis e das preocupações ambientais, a busca por soluções sustentáveis tem se intensificado. Nesse contexto, lubrificantes biodegradáveis originários de fontes renováveis emergem como alternativas promissoras, alinhando-se às regulamentações ambientais mais restritivas (Abdulbari e Zuhan, 2018; Mannekote *et al.*, 2018; Castro *et al.*, 2019). A transição para biolubrificantes é incentivada pela demanda por produtos sustentáveis, avanços tecnológicos na síntese e modificação de óleos vegetais e políticas públicas voltadas à sustentabilidade (Stachowiak e Batchelor, 2000; Chan *et al.*, 2018).

Neste sentido, óleos vegetais, como os de mamona (*Ricinus communis*) e urucum (*Bixa orellana*), destacam-se como alternativas ambientalmente responsáveis para lubrificação, devido à sua biodegradabilidade e renovabilidade. Contudo, para competir com os óleos minerais, esses lubrificantes precisam superar limitações técnicas relacionadas à estabilidade térmica e à oxidação, que afetam seu desempenho e durabilidade. Pesquisas recentes indicam que a adição de nanopartículas a esses lubrificantes pode aprimorar suas propriedades tribológicas, reduzindo o atrito e o desgaste (Stachowiak e Batchelor, 2000; Dai *et al.*, 2016).

A utilização de nanopartículas em lubrificantes vegetais tem sido explorada como uma estratégia inovadora para aprimorar suas propriedades tribológicas. A adição de nanopartículas atua de forma semelhante aos aditivos convencionais, melhorando a eficiência da lubrificação e desempenhando funções antiatrito e anti-desgaste, contribuindo para a prolongação da vida útil dos componentes mecânicos. Nanopartículas de óxido de zinco (ZnO) são especialmente atraentes devido à sua

alta estabilidade térmica e propriedades antimicrobianas (Silva, 2023). Além disso, a dopagem do ZnO com molibdênio (Mo) pode melhorar ainda mais suas propriedades tribológicas, oferecendo resistência ao desgaste e redução do atrito (Carreteiro e Belmiro, 2006; Freitas, 2018).

Esta pesquisa é de natureza aplicada, com enfoque quantitativo e objetivo explicativo, utilizando procedimentos experimentais para investigar os efeitos da adição de nanopartículas a óleos lubrificantes, tanto minerais quanto vegetais. O objetivo principal é avaliar o desempenho tribológico desses lubrificantes, com e sem a inclusão de nanoaditivos, analisando parâmetros como atrito e desgaste em superfícies de contato.

Devido as suas ótimas propriedades tribológicas, este trabalho investiga os efeitos da adição de nanopartículas de óxido de zinco (ZnO) e óxido de zinco dopado de molibdênio (ZnO/MoO₃) em lubrificantes baseados em óleo mineral (PNM55) e óleos vegetais de mamona e urucum. Avalia-se a influência dessas nanopartículas no coeficiente de atrito, a eficácia na redução do desgaste e compara-se o desempenho entre lubrificantes vegetais e minerais. incluindo testes de atrito e desgaste em um tribômetro Pin-On-Disk, para avaliar o desempenho sob condições operacionais programadas. Análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia são empregadas para examinar as interações entre as nanopartículas e os lubrificantes.

Por meio desses estudos, pretendeu-se alcançar uma compreensão aprofundada dos mecanismos subjacentes como a formação de filmes protetores, modificações de interações de partículas e alterações nas propriedades físico-química do lubrificante responsáveis pelas mudanças tribológicas observadas. Isso permitiu avaliar a viabilidade e os benefícios potenciais dessas formulações de lubrificantes para aplicações industriais, onde a eficiência operacional e a durabilidade são de suma importância. Em última análise, esta pesquisa busca contribuir para o avanço do conhecimento na área da tribologia e fornecer *insights* valiosos para a otimização de lubrificantes inovadores.

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste projeto de pesquisa é investigar os efeitos da adição de nanopartículas de óxido de zinco (ZnO) e óxido de zinco dopado de molibdênio (ZnO /MoO₃), tanto individualmente como em combinação, em óleos lubrificantes minerais e vegetais, analisando suas influências nas propriedades tribológicas de superfícies metálicas em contato. O estudo busca contribuir para o avanço do conhecimento na área da tribologia, fornecendo dados relevantes para o desenvolvimento de tecnologias que aumentem a eficiência, durabilidade e confiabilidade de sistemas mecânicos em aplicações industriais e tecnológicas.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- (A) Avaliar o desgaste tribológico por meio da variação de massa das amostras antes e depois dos ensaios, determinando a eficiência dos lubrificantes na redução do desgaste;
- (B) Analisar o coeficiente de atrito dos lubrificantes minerais e vegetais com e sem adição de nanopartículas, comparando seus desempenhos sob as condições operacionais;
- (C) Examinar a morfologia e o tamanho das partículas de desgaste nos lubrificantes após os ensaios tribológicos, utilizando técnica de ferrografia para identificar os mecanismos de desgaste predominantes;
- (D) Caracterizar as nanopartículas de ZnO e MoO₃, analisando tamanho, estrutura e estabilidade, e avaliar sua influência nas respostas tribológicas dos lubrificantes testados;
- (E) Caracterizar os óleos minerais e vegetais utilizados, avaliando propriedades físico-químicas como viscosidade, índice de acidez, densidade e estabilidade térmica, a fim de correlacionar suas características com o desempenho tribológico.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esse capítulo apresenta inicialmente uma revisão sobre o que é Tribologia, apresentando o contexto e as vantagens do surgimento dessa ciência a qual se baseia esse trabalho. Além disso conterá um breve resumo sobre mecanismos de lubrificação apresentando uma base forte para a condução da pesquisa tratada. Em seguida será comentado sobre trabalhos de grande importância na área que inspiraram a elaboração desse trabalho.

2.1 TRIBOLOGIA

O termo tribologia, surge do radical grego *tribos*, que significa arrastar-se, esfregar-se, e do sufixo *logos*, que significa estudo. Em 9 de maio de 1966 o termo foi definido como “a ciência e tecnologia de duas superfícies em contato com movimento relativo e as práticas relacionadas a estas” (Stachowiak e Batchelor, 2000; Lievens e Rayborn, 2022). O estudo desta ciência busca controlar as forças e os fenômenos relacionados a este movimento (Dowson *et al.*, 1997).

Atribuída à muita importância econômica, a tribologia aplica análise operacional a problemas como confiabilidade, manutenção e desgaste de equipamentos técnicos. Seu escopo abrange diversas aplicações, desde eletrodomésticos até espaçonaves, incluindo indústrias automotiva, aeroespacial, naval, de energia, metalurgia, manufatura e muitas outras. Por meio do estudo da interação entre as superfícies em movimento, a tribologia busca desenvolver soluções e estratégias para otimizar a eficiência, reduzir o desgaste e melhorar a confiabilidade dos sistemas mecânicos (Stachowiak e Batchelor, 2000; Mahad *et al.*, 2019).

A lubrificação é um elemento-chave na tribologia, envolvendo o uso de substâncias chamadas lubrificantes para reduzir o atrito e o desgaste entre duas superfícies. Embora os lubrificantes mais comuns sejam derivados de petróleo, atualmente há bastante pesquisa relacionada aos biolubrificantes de base vegetal, que ganham destaque devido à sua vantagem ambiental (Mahad *et al.*, 2019).

A tribologia é principalmente relacionada aos fenômenos de desgaste, atrito e lubrificação, sendo estes os principais objetos de estudo dessa ciência. Estudando os mais variados mecanismos de lubrificação (Mahad *et al.*, 2019).

2.1.1 Mecanismos de Lubrificação

Com a evolução e o desenvolvimento das máquinas, tornou-se um desafio superar as demandas por lubrificantes cada vez mais complexos. Embora a base permaneça a mesma, já que a prevenção do contato metal – metal por meio de uma camada intermediária de fluido ainda é o objetivo, o estudo da lubrificação moderna tem se tornado cada vez mais desafiador (Han *et al.*, 2018).

Com o aumento da complexidade e da demanda de máquinas e projetos de grande porte a tribologia também precisou inovar buscando trazer lubrificantes que supriam a demanda e mecanismos capazes de intensificar a capacidade destes, surgindo assim as nanopartículas, que funcionam de forma análoga a um catalisador, melhorando as condições de lubrificação (Mahad *et al.*, 2019; Zaki *et al.*, 2022).

Além disso com o surgimento de movimentos ambientais, bem como o desenvolvimento do conhecimento em sustentabilidade, tornou-se um desafio a utilização de lubrificantes biodegradáveis, pensando na manutenção e na conservação do meio ambiente (Sun e Du , 2019). Sendo assim, na lubrificação moderna busca-se soluções alternativas que melhorem os fenômenos esperados em um ambiente tribológico. Deste modo, pode-se dividir os mecanismos de lubrificação em gasosos, sólidos, semissólidos e líquidos (Mahad *et al.*, 2019).

2.1.1.1 Lubrificantes Gasosos

Por possuírem menor viscosidade, esses lubrificantes possuem aplicações principalmente em superfícies cuja tensão de carga é baixa, e em superfícies limpas. Devido à sensibilidade dos mesmos, a magnitude da carga, bem como a contaminação da superfície são fatores determinantes no resultado da lubrificação, de modo que, as aplicações desse tipo de mecanismo são limitadas e muito específicas. Geralmente utiliza-se ar seco ou gases nobres e apresenta características de incompressibilidade e de alta penetração nos pares de contato (Almeida, 2015).

2.1.1.2 Lubrificantes Sólidos

Os lubrificantes sólidos são definidos como materiais que podem formar uma camada entre as superfícies em contato, envolvendo as superfícies e provocando a

diminuição do atrito e do desgaste, formando uma película fina que protege as peças. Lubrificantes sólidos tem sido cada vez mais estudados dentro da academia possuindo várias vertentes em pesquisas de desenvolvimento e entendimento de produtos (Fominski *et al.*, 2020).

Lubrificantes sólidos são uma solução necessária em ambientes com condições extremas de funcionamento, onde lubrificantes líquidos e gasosos não podem ser usados devido às condições severas de operação. Podem ser usados em reatores nucleares, aplicações de alto vácuo e em qualquer processo tribológico envolvendo temperaturas e pressões de extrema magnitude (Hutchings e Shipway, 2017; Chaudhary *et al.*, 2022).

A categoria dos lubrificantes sólidos inclui pós sintéticos, metálicos ou minerais como o poli tetra-flúor-etileno (PTFE), cobre, grafita e o dissulfeto de molibdênio (MoS_2), sendo a grafita o lubrificante sólido de uso mais comum (Hutchings e Shipway, 2017).

2.1.1.3 Lubrificantes Semissólidos

Os lubrificantes semissólidos são assim chamados devido à sua consistência que não é sólida e nem líquida em condições normais de temperatura e pressão, são plenamente consolidados industrialmente possuindo uma gama elevada de aplicações, os mais conhecidos são as graxas que podem variar de um estado semifluido até o estado sólido. As graxas são compostas geralmente de um fluido em conjunto com um espessante que atua como estrutura tridimensional, permitindo aderência em superfícies mesmo em condições severas, como altas cargas e temperaturas extremas (Cortés-Triviño *et al.*, 2018).

A maior vantagem do uso de graxas é o fato de que esses lubrificantes são duráveis e não se deterioram rapidamente como os lubrificantes líquidos, além disso requerem menos consumo e eliminam a contaminação. Por outro lado, dentre as suas desvantagens está o fato de não ser um ótimo lubrificante na dissipação de calor, além da permanência das partículas de desgaste na região de atrito (Hutchings e Shipway, 2017; Cortés-Triviño *et al.*, 2018).

2.1.1.4 Lubrificantes Líquidos

Óleos lubrificantes surgiram há milhares de anos sendo seus primeiros registros datados desde 1400 A.C., sendo amplamente utilizados até hoje em aplicações modernas, sendo que esses lubrificantes passaram por evoluções contínuas ao longo dos séculos desde os convencionais até os óleos sintéticos. Primordialmente eram usados óleos de origem animal e vegetal, com a modernização e o surgimento do petróleo começaram a surgir óleos de origem mineral (Nowak *et al.*, 2017; Hutchings e Shipway, 2017).

Durante o desenvolvimento das tecnologias e com o avanço da engenharia moderna, surgiu a necessidade da utilização de óleos mais refinados que melhorariam a capacidade de lubrificação das aplicações, dentro desse contexto os óleos minerais obtiveram um aumento significativo no rendimento e na capacidade com as melhorias do refino do petróleo, sendo até hoje o mais utilizado nas mais diversas situações. Além disso para os casos de condições mais extremas de funcionamento, apresentou-se a necessidade dos lubrificantes sintéticos como os polialfaolefinas (PAOs) e outros materiais especiais. Além disso com a necessidade da diminuição dos impactos ambientais surgiram novos estudos na utilização de óleos vegetais com a adição de aditivos, de modo a buscar uma solução para as questões ambientais (Pirro *et al.*, 2017).

2.1.1.4.1 Óleos Básicos Minerais

Os óleos minerais são derivados do petróleo por meio de processos de destilação e refino, sendo classificados em três categorias principais de acordo com o tipo predominante de hidrocarboneto: parafínicos, naftênicos e aromáticos. Cada molécula de óleo mineral é composta por cadeias de hidrocarbonetos com cerca de 20 a 50 átomos de carbono. Nos óleos parafínicos, predominam os alcanos lineares e ramificados; nos naftênicos, os cicloalcanos com cadeias laterais; e nos aromáticos, os alquilbenzenos (Carreteiro e Belmiro, 2006). No presente estudo, utilizou-se um óleo mineral de base parafínica, o PNM 55, que apresenta um alto índice de viscosidade e uma elevada volatilidade.

Devido à diversidade de composições e propriedades dos óleos minerais, torna-se fundamental classificá-los de maneira sistemática para padronizar seu uso

em aplicações industriais. A necessidade de estabelecer padrões técnicos impulsionou o aprimoramento dos sistemas de categorização, permitindo a diferenciação dos óleos básicos com base em sua estrutura química, pureza e desempenho lubrificante (Carreteiro e Belmiro, 2006; Pirro *et al.*, 2017).

Com esse objetivo, o American Petroleum Institute (API) desenvolveu um sistema de classificação que divide os óleos básicos de lubrificantes em cinco grupos. Originalmente criado para auxiliar no licenciamento de óleos para motores a gasolina e diesel, esse sistema atualmente se aplica a uma ampla gama de produtos, orientando a escolha do lubrificante adequado. Os grupos são definidos com base no nível de saturação dos hidrocarbonetos, no teor de enxofre e no índice de viscosidade (Carreteiro e Belmiro, 2006; Abdulbari e Zuhan, 2018):

Grupo I: Óleos minerais com teor de enxofre superior a 0,03%, teor de saturados inferior a 90%, e índice de viscosidade entre 80 e 120.

Grupo II: Óleos minerais com teor de enxofre inferior a 0,03%, saturados acima de 90%, e índice de viscosidade entre 80 e 120.

Grupo III: Óleos minerais com baixo teor de enxofre (menos de 0,03%), saturados acima de 90%, e índice de viscosidade superior a 120.

Grupo IV: Óleos baseados em polialfaolefinas (PAOs), que são obtidos sinteticamente a partir de hidrocarbonetos gasosos como o etileno.

Grupo V: Categoria abrangente que inclui óleos naftênicos de base mineral e outros óleos não incluídos nos grupos anteriores, como bases sintetizadas não convencionais.

Essas classificações ajudam na escolha adequada do lubrificante, garantindo que suas propriedades atendam às exigências operacionais, como resistência à oxidação, estabilidade térmica e desempenho em variações de temperatura (Norton, 2013; Chang *et al.*, 2015).

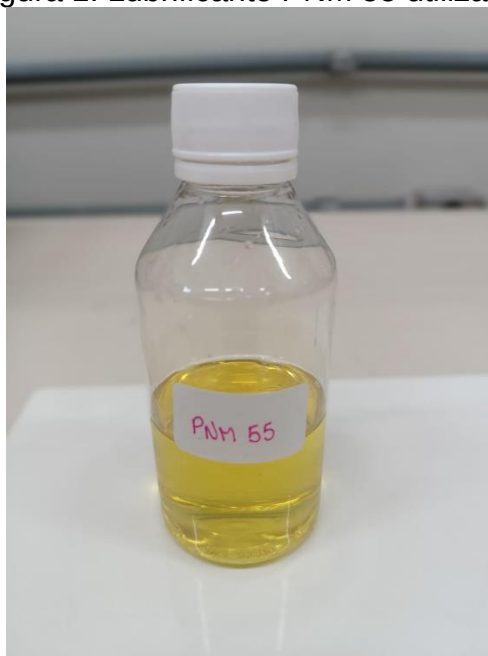
2.1.1.4.1.1 Óleo Mineral PNM 55

O PNM 55 é um óleo mineral de base parafínica amplamente utilizado como lubrificante em aplicações industriais, especialmente em sistemas que operam sob condições severas, como altas cargas e variações de temperatura. Ele possui uma viscosidade elevada, garantindo a formação de um filme lubrificante eficiente, que

reduz o atrito e o desgaste entre superfícies metálicas, prolongando a vida útil dos componentes (Solomon *et al.*, 2023; Chiarello e Todt, 2019).

Com um índice de viscosidade estável, este óleo oferece desempenho confiável em uma ampla faixa de temperaturas, evitando o espessamento em baixas temperaturas e a degradação em altas (Lago, 2007; Chiarello e Todt, 2019). Além disso, sua baixa volatilidade minimiza a evaporação durante a operação, mantendo a eficiência de lubrificação por longos períodos. A resistência à oxidação do óleo também evita a formação de depósitos, que podem comprometer o desempenho do equipamento (Desanker *et al.*, 2016). A Figura 1 representa o lubrificante mineral usado.

Figura 1: Lubrificante PNM 55 utilizado.



Fonte: Autoria Própria (2025).

O PNM 55 é formulado com aditivos anti-desgaste e de extrema pressão, proporcionando proteção adicional em operações de alta carga e pressão. Isso o torna ideal para sistemas hidráulicos, compressores e redutores, entre outros equipamentos industriais, oferecendo uma solução eficaz e econômica para garantir durabilidade e eficiência operacional (Desanker *et al.*, 2016).

2.1.1.4.2 Óleos Básicos Sintéticos

Os óleos sintéticos são lubrificantes produzidos por processos químicos, resultando em uma composição molecular mais uniforme e ajustada para operar em condições extremas. Eles oferecem excelente desempenho em altas e baixas temperaturas, mantendo a fluidez onde os óleos minerais poderiam falhar, além de maior resistência à oxidação e à degradação, prolongando os intervalos entre trocas (Murru *et al.*, 2021).

Com um índice de viscosidade naturalmente elevado, os óleos sintéticos garantem estabilidade sem a necessidade de muitos aditivos. Sua estabilidade térmica os torna ideais para aplicações industriais e automotivas que operam sob altas pressões e temperaturas, reduzindo a formação de depósitos e a perda de desempenho ao longo do tempo (Lago, 2007; Chiarello; Todt, 2019).

Em termos de fatores tribológicos, esses óleos proporcionam melhor proteção contra desgaste e fricção, especialmente em operações de alta carga e velocidade. Eles também apresentam menor volatilidade, o que reduz o consumo de óleo e melhora a eficiência dos sistemas, sendo amplamente usados em motores de alto desempenho e sistemas que exigem alta confiabilidade e durabilidade (Norton, 2013; Kumar *et al.*, 2022)

2.1.1.4.3 Óleos Básicos Vegetais

Os óleos vegetais foram, por milênios, a principal fonte de lubrificação e energia, utilizados em diversas civilizações. Entretanto, seu protagonismo começou a decair com o advento dos óleos minerais derivados do petróleo, que apresentavam vantagens econômicas e de desempenho para a época, como maior estabilidade oxidativa e menor custo de produção. Com o tempo, os óleos minerais se tornaram amplamente dominantes devido à sua abundância e eficiência. No entanto, as preocupações ambientais e a escassez dos recursos fósseis vêm incentivando o retorno aos estudos sobre óleos vegetais como alternativas sustentáveis (Carreteiro e Belmiro, 2006; Dai *et al.*, 2016).

Do ponto de vista tribológico, os óleos vegetais possuem características interessantes. Eles são naturalmente biodegradáveis e apresentam boas propriedades lubrificantes, devido à sua alta viscosidade e capacidade de formar

filmes lubrificantes estáveis. Os óleos graxos, por exemplo, são compostos principalmente por triacilgliceróis, que apresentam excelente capacidade de lubrificação (Hutchings e Shipway, 2017). A estrutura molecular dos ácidos graxos, com diferentes tamanhos de cadeias e níveis de saturação, influencia diretamente suas propriedades tribológicas, como resistência à oxidação, estabilidade térmica e eficiência na redução do atrito. Já os óleos essenciais, por serem compostos principalmente de terpenóides, possuem propriedades antioxidantes e antibacterianas, mas seu uso como lubrificante é mais limitado, embora sejam explorados em outras indústrias, como a cosmética e farmacêutica (Hu *et al.*, 2021).

A crescente busca por lubrificantes biodegradáveis, impulsionada pela conscientização ambiental, vem trazendo os óleos vegetais de volta à pauta científica. Eles podem ser uma solução para reduzir os impactos ecológicos provocados pelo descarte de óleos minerais, que muitas vezes são despejados sem tratamento adequado. Embora os óleos minerais tenham substituído os vegetais devido a vantagens técnicas, os óleos vegetais estão sendo reconsiderados, pois apresentam um perfil sustentável, além de promoverem a diversificação da matriz energética (Silva, 2023). A substituição dos óleos minerais pelos vegetais pode reduzir a dependência de fontes não renováveis e aumentar a sustentabilidade da indústria de lubrificantes (Carreteiro e Belmiro, 2006; Achcar, 2015).

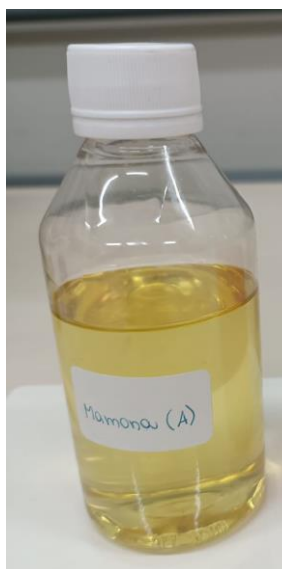
2.1.1.4.3.1 Óleo graxo de Mamona (*Ricinus communis* L.)

A mamona (*Ricinus communis*) é uma planta nativa da África Oriental, amplamente cultivada em várias partes do mundo, especialmente em regiões tropicais e subtropicais. A mamona possui um ciclo de crescimento rápido e é altamente resistente a condições adversas, tornando-se uma fonte economicamente viável para diversos países, como o Brasil e a Índia, que são os maiores produtores mundiais (Xu *et al.*, 2021).

A extração do óleo de mamona se dá principalmente por prensagem a frio ou a quente das sementes, seguidos de processos de refino para remover impurezas. O óleo obtido tem uma consistência viscosa, com coloração amarelada a incolor, e um odor característico. Sua principal característica química é a alta concentração de ácido ricinoleico (aproximadamente 85-90%), que confere ao óleo propriedades únicas em

comparação a outros óleos vegetais, como alta viscosidade, solubilidade em álcool e resistência à oxidação (Perez, 2003; Xu *et al.*, 2021). A Figura 2 apresenta o óleo utilizado em laboratório, bem como a árvore da Mamona.

Figura 2: Árvore de origem do óleo e o óleo extraído.



a) Óleo



b) Árvore

Fonte: Aleksrybalko, s.d.(Adaptado).

Historicamente, o óleo de mamona foi utilizado em várias aplicações, desde lubrificação de máquinas na revolução industrial até a produção de sabões e cosméticos. Atualmente, suas aplicações são amplas, incluindo desde a indústria automotiva (como fluido hidráulico e lubrificante de motores), a cosmética (emolientes, cremes e produtos para o cabelo), até o setor farmacêutico (como laxante e em formulações de medicamentos). Além disso, o óleo de mamona é uma matéria-prima essencial para a fabricação de biocombustíveis, devido à sua biodegradabilidade e fonte renovável (Karak, 2012).

Do ponto de vista socioeconômico, a mamona é uma cultura de grande importância para pequenos agricultores, especialmente em regiões secas, como o semiárido brasileiro. Ela tem a vantagem de ser cultivada em solos de baixa fertilidade, demandando poucos insumos e gerando emprego em comunidades rurais. Além disso, o interesse crescente por produtos sustentáveis e biodegradáveis trouxe à tona um renascimento do uso do óleo de mamona em várias indústrias, como parte da transição para materiais renováveis e ecologicamente corretos (Ludema, 1966; Karak, 2012).

As vantagens tribológicas do óleo de mamona incluem sua alta viscosidade natural, que permite a formação de um filme lubrificante resistente, e sua boa estabilidade térmica, que o torna adequado para aplicações em altas temperaturas. Ele também é um excelente candidato para lubrificantes biodegradáveis, já que é facilmente degradado no meio ambiente, o que reduz o impacto ecológico em comparação aos óleos minerais (Abdulbari e Zuhair, 2018). Essa combinação de sustentabilidade, baixo custo e bom desempenho tem levado ao aumento dos estudos e da aplicação desse óleo em soluções inovadoras para a lubrificação industrial (Ludema, 1966; Chan *et al.*, 2018).

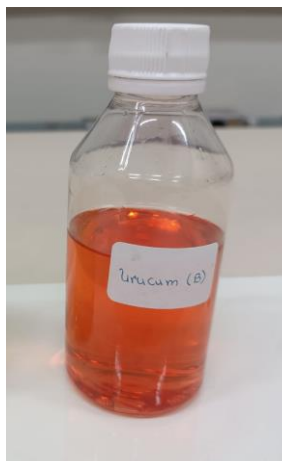
2.1.1.4.3.2 Óleo graxo de Urucum (*Bixa orellana* L.)

O óleo de urucum é extraído das sementes do *Bixa orellana*, uma planta nativa da América tropical, particularmente das regiões amazônicas. Conhecida por seus frutos avermelhados e amplamente cultivada em países como o Brasil, o urucum tem uma longa história de uso entre os povos indígenas, que utilizavam seu pigmento natural, a bixina, como corante para alimentos, tintas, cosméticos e em rituais culturais. Com o tempo, o urucum se tornou uma importante commodity agrícola e industrial, expandindo seu uso para diversas aplicações (Cordeiro, 2019).

A extração do óleo de urucum é feita por prensagem das sementes ou por processos de maceração. O óleo tem uma coloração avermelhada vibrante, devido à presença da bixina e norbixina, carotenoides que são responsáveis por seu poder corante e propriedades antioxidantes. Além disso, o óleo de urucum contém uma série de compostos bioativos, como vitamina E, ácido linoleico e ácidos graxos insaturados, que o tornam altamente nutritivo e versátil para diferentes finalidades (Cordeiro, 2019).

A Figura 3 apresenta o óleo e sua origem.

Figura 3: Sementes de origem do óleo e o óleo extraído.



a) Óleo



b) Sementes

Fonte: Cordeiro, 2019 (Adaptado).

Historicamente, o urucum foi amplamente utilizado como corante natural tanto na culinária quanto em cosméticos, sendo um substituto para corantes sintéticos. O óleo de urucum também tem forte apelo na indústria alimentícia, utilizado como corante em queijos, manteigas e massas, e na cosmética, em produtos para proteção solar e tratamentos para a pele, graças às suas propriedades antioxidantes e anti-inflamatórias. O óleo também apresenta usos terapêuticos, sendo empregado em formulações que promovem a cicatrização e a regeneração da pele (Cordeiro, 2019).

No contexto socioeconômico, o óleo de urucum tem ganhado relevância devido à crescente demanda por produtos naturais e sustentáveis. Agricultores em áreas tropicais, como o Brasil, têm encontrado no cultivo de urucum uma oportunidade para diversificação de renda, especialmente em regiões onde a cultura pode se adaptar bem a solos menos férteis. O urucum, além de ter um valor cultural e histórico forte, também se destaca como uma commodity de alto valor agregado, especialmente com o aumento da conscientização ambiental e do consumo de produtos orgânicos e livres de corantes artificiais (Achcar, 2015; Cordeiro, 2019).

Em termos de propriedades tribológicas, o óleo de urucum não é amplamente conhecido como lubrificante industrial, mas suas propriedades antioxidantes e sua estabilidade a altas temperaturas sugerem potencial de uso em formulações biodegradáveis e em áreas como lubrificantes cosméticos ou para proteção da pele em condições extremas. Embora não tenha o mesmo foco tribológico que óleos como o de mamona, o óleo de urucum pode ser explorado em nichos industriais onde a

combinação de lubrificação suave, biocompatibilidade e propriedades antioxidantes sejam necessárias (Carreteiro e Belmiro, 2006)

2.1.1.5 Aditivos tradicionalmente utilizados

Os aditivos são substâncias químicas adicionadas aos óleos base para formar os lubrificantes comerciais, com o objetivo de melhorar o desempenho e conferir propriedades específicas que o óleo base sozinho não poderia oferecer. Embora algumas características, como volatilidade, sejam intrínsecas ao tipo de óleo base e não possam ser alteradas, muitas outras propriedades podem ser otimizadas, como o índice de viscosidade, ponto de fluidez e resistência à oxidação. Esses aditivos são cruciais para que os lubrificantes operem eficientemente em condições desafiadoras, como altas temperaturas, pressões elevadas e ambientes contaminados (Carreteiro e Belmiro, 2006; Kimura, 2010; Kumar *et al.*, 2022)

Historicamente, o uso de aditivos começou a ganhar destaque no início do século XX, à medida que a tecnologia industrial evoluía e as máquinas exigiam maior resistência ao desgaste e ao calor. A introdução de aditivos ajudou a superar limitações técnicas dos lubrificantes de base pura, permitindo que os lubrificantes acompanhassem o ritmo da revolução industrial e o aumento da complexidade mecânica. Ao longo dos anos, o desenvolvimento de novos compostos químicos, como inibidores de oxidação, detergentes e aditivos de extrema pressão (EP), foi essencial para melhorar o desempenho dos lubrificantes em condições extremas, como nas indústrias automotiva e aeronáutica (Carreteiro e Belmiro, 2006; Block e Bannister, 2020).

No campo tribológico, os aditivos desempenham papel fundamental em várias frentes. Aditivos de extrema pressão (EP), como compostos de enxofre, fósforo ou cloro, são usados para reduzir o atrito e o desgaste em situações em que há contato metal-metal sob altas cargas, prevenindo danos severos às superfícies (Block e Bannister, 2020). Já os aditivos antidesgaste, como o ZDDP (Ditiofosfato de Zinco), formam uma camada protetora nas superfícies metálicas, prevenindo o contato direto e prolongando a vida útil das peças. Recentemente, a busca por alternativas mais ecológicas tem incentivado o uso de nanopartículas como substitutos para aditivos tradicionais, reduzindo o impacto ambiental sem comprometer o desempenho tribológico (Stachowiak e Batchelor, 2000; Cui e Sun, 2017).

2.1.1.6 Nanoaditivos

Os nanoaditivos são partículas em escala nanométrica que, quando adicionadas a lubrificantes, oferecem melhorias significativas nas propriedades tribológicas, como redução do atrito e do desgaste entre superfícies em contato (Bayer, 2004). Esses aditivos atuam através de quatro mecanismos principais: o efeito de rolamento, onde as nanopartículas se comportam como pequenos roletes, convertendo o atrito deslizante em atrito rolante; o efeito de polimento, que suaviza a superfície de contato; o efeito de reparo, onde as nanopartículas preenchem falhas e compensam o desgaste; e a formação de um filme protetor, que impede o contato direto entre as superfícies (Stachowiak e Batchelor, 2000; Alves, 2014)

Esses mecanismos contribuem para a criação de um ambiente de lubrificação mais eficiente, com maior proteção contra danos em condições severas de operação, como altas temperaturas e pressões (Block e Bannister, 2020). Além disso, os nanoaditivos podem melhorar o desempenho de lubrificantes convencionais e biolubrificantes, tornando-os alternativas viáveis e ecologicamente mais sustentáveis, uma vez que ajudam a prolongar a vida útil das superfícies de atrito e reduzir o impacto ambiental associado ao uso de lubrificantes tradicionais (Carreteiro e Belmiro, 2006; Lago, 2007; Silva, 2023).

A combinação de nanopartículas com óleos base também permite o ajuste fino de propriedades, como viscosidade e capacidade de carga, contribuindo para uma lubrificação mais eficaz e eficiente em diversas aplicações industriais (Alves, 2014; Singh *et al.*, 2023). Em termos de classificação, as nanopartículas podem ser categorizadas de várias maneiras, levando em consideração sua composição química, tamanho ou morfologia (Yang *et al.*, 2013).

De acordo com Dai *et al.*, (2016), as nanopartículas de óxidos metálicos apresentam papel fundamental na melhoria da lubrificação por meio de mecanismos complexos. Essas partículas extremamente pequenas operam em vários níveis para aprimorar a eficácia da lubrificação. Em primeiro lugar, elas têm a capacidade de rolar entre as superfícies em movimento, o que reduz o atrito e o desgaste. Esse mecanismo de rolamento promove um deslizamento mais suave e eficiente, proporcionando uma camada protetora das superfícies em contato.

2.1.1.6.1 Óxido de Zinco (ZnO)

O óxido de zinco (ZnO) tem se destacado como um nanoaditivo eficaz em várias aplicações, especialmente em óleos isolantes usados em transformadores e outros sistemas elétricos (Singh *et al.*, 2021). Sua principal vantagem reside na sua natureza semicondutora, o que contribui para sua capacidade de melhorar a rigidez dielétrica dos óleos. Estudos demonstraram que o uso de nanopartículas de ZnO pode aumentar significativamente a tensão de ruptura em óleos vegetais e minerais, frequentemente na faixa de 30% a 40%, tornando-o uma escolha preferida para o desenvolvimento de nanofluidos para fins de isolamento elétrico (Taha-Tijerina *et al.*, 2018; Saleem *et al.*, 2019).

Além de sua capacidade de melhorar a resistência dielétrica, o ZnO apresenta propriedades condutivas que permitem capturar elétrons rápidos e inibir a propagação de descargas elétricas ou "streamers" em óleos, o que é particularmente benéfico em sistemas sujeitos a altos níveis de tensão. Sua baixa permitividade também contribui para reduzir o tempo de relaxamento, o que facilita a resposta rápida a variações nas condições operacionais do sistema (Taha-Tijerina *et al.*, 2018).

Na tribologia, o ZnO também é amplamente utilizado como aditivo em óleos lubrificantes devido à sua capacidade de formar filmes protetores sobre superfícies metálicas, melhorando a resistência ao desgaste e à fricção. Sua incorporação em óleos vegetais e minerais tem mostrado reduzir significativamente o desgaste e o atrito em aplicações de alta carga, como motores e sistemas hidráulicos (Gara e Zou, 2013; Hutchings e Shipway, 2017).

Além disso, o ZnO apresenta uma excelente estabilidade térmica e química, tornando-o adequado para uma ampla gama de condições operacionais. Isso, aliado à sua baixa toxicidade e custo relativamente acessível, faz do ZnO uma escolha atrativa tanto do ponto de vista técnico quanto econômico. Em suma, as nanopartículas de óxido de zinco oferecem uma combinação única de propriedades elétricas e tribológicas, o que explica sua crescente popularidade como aditivo em formulações de óleos para transformadores e lubrificantes industriais (Gara e Zou, 2013; Hutchings e Shipway, 2017; Singh *et al.*, 2021).

2.1.1.6.2 Óxido de Zinco dopado com Molibdênio (ZnO/MoO₃)

A combinação de nanopartículas de óxido de zinco (ZnO) dopadas com trióxido de molibdênio (MoO₃) oferece um conjunto de propriedades promissoras para aplicações tribológicas, apesar de não ser amplamente explorada nesse campo. As nanopartículas de ZnO são conhecidas por suas propriedades semicondutoras e alta dureza, o que contribui para a redução do desgaste em superfícies de contato. Já o MoO₃, com suas características de alta capacidade de adsorção e estabilidade térmica, pode potencialmente melhorar a dispersão do ZnO, além de atuar como um modificador de superfície, facilitando o deslizamento e minimizando o atrito (Taha-Tijerina *et al.*, 2018; Ramesh; Shivanna, 2021; Singh *et al.*, 2021).

Ao incorporar essas nanopartículas em lubrificantes ou revestimentos tribológicos, a interação entre ZnO e MoO₃ pode otimizar o desempenho em condições de alta carga e temperaturas elevadas (Zhao *et al.*, 2021). A dopagem com MoO₃ pode fornecer uma camada protetora adicional, prevenindo a oxidação das superfícies de contato e, ao mesmo tempo, promovendo o efeito de polimento das nanopartículas de ZnO. Esse efeito combinado pode contribuir para a formação de filmes protetores de baixa fricção nas superfícies, que são cruciais para a eficiência em sistemas de desgaste mecânico (Taha-Tijerina *et al.*, 2018; Santos-Beltrán *et al.*, 2021).

Além disso, o MoO₃ apresenta a vantagem de estabilizar as nanopartículas de ZnO, evitando sua aglomeração e garantindo uma dispersão uniforme, o que é fundamental para manter a consistência do desempenho tribológico (Singh *et al.*, 2021). Embora ainda seja necessária mais pesquisa para entender totalmente os efeitos sinérgicos dessa combinação, os potenciais aplicações vão desde a formulação de lubrificantes avançados até revestimentos para componentes de motores e máquinas sujeitas a desgaste intenso (Cui; Sun, 2017).

Esses nanomateriais podem também oferecer melhor desempenho sob condições severas, como altas pressões e temperaturas, características comuns em indústrias como a automotiva e aeroespacial. Portanto, a combinação de ZnO e MoO₃ apresenta um grande potencial de exploração para o desenvolvimento de soluções tribológicas inovadoras, com o objetivo de aumentar a vida útil de componentes críticos e reduzir os custos de manutenção associados ao desgaste mecânico (Ramesh; Shivanna, 2021).

2.1.2 Atrito

Em situações envolvendo deslizamento ou rolamento, um termo associado ao desgaste é o atrito. O atrito é definido como a força que se opõe ao movimento relativo entre duas superfícies, o atrito é caracterizado pelo coeficiente de atrito (μ), que é a razão entre a força de atrito (F_{at}) e a força normal (F_N) que pressiona as superfícies em contato. Historicamente, essa relação foi proposta por Leonardo da Vinci por volta de 1500, e desde então tem sido amplamente utilizada, apesar das diversas formulações alternativas que surgiram ao longo do tempo (Hutchings; Shipway, 2017; Lievens; Rayborn, 2022).

Inicialmente, o coeficiente de atrito era tratado como uma constante para determinados pares de materiais, mas a compreensão moderna da tribologia, como ressaltado por Ludema (1966), reconhece que o coeficiente de atrito é variável e depende de diversos parâmetros operacionais, como umidade, temperatura, velocidade e pressão de contato, além das propriedades das superfícies e lubrificantes. O atrito, portanto, não é uma propriedade intrínseca dos materiais, mas uma característica da interação entre superfícies e suas condições operacionais. Isso torna a análise e o controle do atrito particularmente complexos e cruciais em contextos tribológicos (Ludema, 1966).

Historicamente, Guillaume Amontons, no século XVII, confirmou as observações de Leonardo da Vinci ao demonstrar experimentalmente que o atrito era causado pela colisão entre irregularidades superficiais, que naquela época eram observadas em escala macroscópica. Posteriormente, Charles Coulomb avançou com a teoria do intertravamento de asperezas, que explicava o atrito como resultado do engajamento entre rugosidades nas superfícies. Entretanto, essa teoria se mostrou limitada, pois não explicava adequadamente o impacto da rugosidade e a ação de filmes fluidos na interface (Bayer, 2004). Em meados do século XX, Bowden e Tabor desenvolveram a teoria da adesão, que considerava o atrito como resultado da deformação plástica das asperezas e a resistência ao cisalhamento dos filmes superficiais, sendo mais aceita na tribologia moderna (Hutchings e Shipway, 2017).

Na era contemporânea, com os avanços nas técnicas de escala molecular, como o microscópio de força atômica, os estudos do atrito evoluíram para uma compreensão mais detalhada dos mecanismos em nível nanométrico (Ludema, 1966). Dowson *et al.*, (1997) destaca que, em escala atômica, o comportamento das

superfícies e dos lubrificantes, especialmente em filmes de espessuras moleculares, pode diferir significativamente das propriedades volumétricas. Esses estudos proporcionaram novas perspectivas sobre o atrito, revelando, por exemplo, que a força de atrito em nanoescala não é diretamente proporcional à carga normal, o que tem importantes implicações no desenvolvimento de materiais e tecnologias tribológicas (Dowson *et al.*, 1997).

O atrito, além de ser um fenômeno determinante na eficiência de sistemas mecânicos, está intimamente relacionado ao desgaste das superfícies, uma vez que as alterações nas tribo-superfícies afetam diretamente ambos (Almeida, 2015). Segundo Bayer (2004), o atrito pode ser visto como o somatório de várias forças resistivas, incluindo adesão, abrasão, fadiga e viscosidade. Devido a essa interdependência com o desgaste, o monitoramento do atrito é frequentemente utilizado para identificar transições em regimes de desgaste, ajudando a prever falhas em sistemas tribológicos (Bayer, 2004).

A relevância do atrito na tribologia vai além da mecânica de superfícies. Ele é também responsável por uma fração significativa da energia dissipada em vários setores da economia (Maru, 2003). Holmberg e Erdemir (2017) destacam que até 30% da energia no setor de mineração e mais de 20% nos setores de transporte e indústria são gastos para superar o atrito. Assim, estudos que visam à redução do atrito, seja por meio de novos materiais, lubrificantes ou modificações nas superfícies, são essenciais não apenas para aumentar a eficiência mecânica, mas também para reduzir o consumo de energia e os custos operacionais (Holmberg; Erdemir, 2017).

2.1.3 Desgaste

O desgaste é definido como uma ação progressiva que provoca avarias e perda de material em um elemento que se movimenta em relação a outro adjacente, sendo este um dos fenômenos mais estudados na tribologia (Stoeterau, 2004). Ele pode ocorrer devido à aplicação de forças mecânicas ou interações intermoleculares entre superfícies em contato. Embora o desgaste seja, muitas vezes, indesejável por provocar a deterioração de componentes e gerar custos elevados de manutenção e substituição de peças, ele também pode ser intencional e vantajoso em processos industriais, como o desbaste e a usinagem, onde a remoção controlada de material é

necessária para a moldagem e o tratamento de superfícies (Stoeterau, 2004; Lago, 2007).

Os estudos de desgaste têm um foco importante na avaliação e seleção de materiais com resistência ao fenômeno, visto que essa é uma das principais causas de falhas mecânicas. Tradicionalmente, a pesquisa sobre desgaste baseia-se em métodos empíricos, com testes laboratoriais e de campo. No entanto, explicações qualitativas sobre o comportamento do desgaste também têm sido aceitas, especialmente com o avanço da modelagem e simulação dos fenômenos tribológicos (Stoeterau, 2004; Kimura, 2010).

Rabinowicz (1995) propôs a divisão dos mecanismos de desgaste em quatro principais tipos: desgaste adesivo, abrasivo, por corrosão e fadiga superficial. Cada um desses mecanismos possui características distintas, embora possam atuar de forma combinada dependendo do sistema tribológico e das condições de operação.

- **Desgaste Adesivo:** O mais comum entre os mecanismos de desgaste, o desgaste adesivo ocorre quando duas superfícies sólidas entram em contato, resultando na formação de "soldas a frio" entre os materiais. A ação de forças de deslizamento rompe essas soldas, causando a remoção de material na forma de crateras ou fragmentos microscópicos. Esse tipo de desgaste é prevalente em superfícies metálicas que operam sob carga elevada e com pouca lubrificação (Rabinowicz, 1995).
- **Desgaste Abrasivo:** Ocorre quando uma superfície mais dura e áspera desliza sobre uma superfície mais macia, provocando ranhuras ou arranhões. A interação se caracteriza pela presença de partículas duras ou superfícies com dureza acentuada que desgastam a superfície menos resistente, resultando em perda de material (Mang e Dresel, 2007).
- **Desgaste por Corrosão:** Envolve a ação de um ambiente corrosivo que gera um produto de corrosão nas superfícies de contato. O desgaste ocorre quando o produto formado é removido por atrito contínuo. Esse fenômeno é frequente em ambientes expostos a gases corrosivos ou líquidos, como áreas costeiras, onde a combinação de corrosão e atrito agrava o desgaste das superfícies (Lago, 2007).
- **Desgaste por Fadiga:** Este mecanismo ocorre em superfícies submetidas a movimentos de rolamento ou deslizamento cíclico. A fadiga superficial resulta da formação e propagação de microfissuras devido a ciclos repetidos de

carregamento e descarregamento. Com o tempo, essas microfissuras crescem e se unem, gerando a remoção de grandes fragmentos de material e deixando cavidades na superfície (Toazza; Sellitto, 2015).

A compreensão dos mecanismos de desgaste é essencial para a otimização do desempenho de sistemas tribológicos (Stoeterau, 2004). O desgaste não apenas impacta a durabilidade e a confiabilidade dos componentes mecânicos, mas também influencia diretamente a eficiência energética e os custos operacionais. A introdução de soluções como lubrificação e aditivos pode minimizar o desgaste e, conseqüentemente, reduzir os danos aos componentes. A lubrificação, por exemplo, cria uma camada protetora que diminui o atrito entre as superfícies, prolongando a vida útil dos materiais (Rabinowicz, 1995; Lago, 2007).

No contexto da tribologia, a pesquisa em lubrificantes e nanoaditivos tem sido uma área de interesse crescente, já que esses materiais podem melhorar significativamente as propriedades tribológicas dos sistemas, diminuindo o atrito e o desgaste. Nanoaditivos como óxido de zinco dopado com MoO_3 , por exemplo, oferecem vantagens na formação de filmes protetores e no polimento das superfícies, evitando o desgaste excessivo (Stoeterau, 2004; Saleem *et al.*, 2019).

A avaliação do desgaste, portanto, é fundamental em qualquer estudo de tribologia, sendo essencial para a seleção de materiais, o desenvolvimento de técnicas de lubrificação eficientes e a prevenção de falhas catastróficas em máquinas e componentes industriais. Além disso, o controle do desgaste permite a otimização de processos industriais, como na usinagem e em tratamentos de superfície, garantindo maior precisão e eficiência (Rabinowicz, 1995; Mang; Dresel, 2007).

2.1.4 Viscosidade

A viscosidade é um dos parâmetros mais críticos na caracterização física de fluidos lubrificantes, fornecendo uma medida da resistência do fluido ao cisalhamento. Definida como a tensão de cisalhamento por unidade de gradiente de velocidade, a viscosidade pode ser expressa em termos de viscosidade cinemática (mm^2/s ou cSt) e viscosidade dinâmica (Pa.s) (Hutchings e Shipway, 2017). Para fluidos newtonianos, a relação entre a tensão de cisalhamento (τ) e a taxa de deformação por cisalhamento (dg/dt) é dada pela Equação 1:

$$\tau = \eta \frac{dg}{dt} \quad (1)$$

onde η é a viscosidade dinâmica do fluido.

A viscosidade cinemática (ν), por sua vez, é definida conforme a Equação 2:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (2)$$

onde ρ representa a massa específica do lubrificante, geralmente assumida em torno de 900 kg/m³ para lubrificantes à base de hidrocarbonetos (Hutchings e Shipway, 2017; Chiarello e Todt, 2019).

A viscosidade dos fluidos lubrificantes tende a diminuir com o aumento da temperatura. Para quantificar essa variação, o índice de viscosidade (IV) é utilizado: quanto maior o IV, menor a alteração da viscosidade em função da temperatura. Óleos automotivos, por exemplo, apresentam altos valores de IV devido à adição de aditivos poliméricos, que conferem maior estabilidade térmica (Chiarello e Todt, 2019).

A dependência da viscosidade em relação à pressão é outro fator importante. A viscosidade aumenta com a pressão de trabalho, conforme a Equação 3:

$$\eta = \eta_0 e^{aP} \quad (3)$$

onde η_0 é a viscosidade à pressão atmosférica e a é um parâmetro específico do óleo. Em pressões de contato elevadas, como 500 MPa, a viscosidade pode aumentar em até 20.000 vezes em comparação com a pressão atmosférica, fazendo com que o óleo se comporte como um sólido na zona de contato (Hutchings; Shipway, 2017).

Embora muitos fluidos lubrificantes básicos sejam considerados newtonianos em condições práticas, alguns fluidos, especialmente aqueles com aditivos melhoradores de viscosidade, podem apresentar comportamento não-newtoniano. Em altas taxas de cisalhamento, a viscosidade pode apresentar diminuição, um fenômeno conhecido como "*shear thinning*" (Dowson *et al.*, 1997; Vergne, 2007). Isso pode impactar negativamente a eficiência na sustentação hidrodinâmica do

lubrificante, resultando em um aumento do atrito e do desgaste nas superfícies em contato.

O estudo da viscosidade é fundamental na tribologia devido à sua influência direta na eficiência de lubrificação e na durabilidade dos componentes mecânicos. Lubrificantes com viscosidade adequada garantem uma película de lubrificação eficaz, reduzindo o atrito e o desgaste entre as superfícies em contato (Achcar, 2015). A escolha do lubrificante deve considerar não apenas a viscosidade em condições normais de operação, mas também como essa viscosidade se comportará em diferentes temperaturas e pressões (Chiarello; Todt, 2019).

Além disso, a compreensão do comportamento viscoso dos fluidos é crucial para o desenvolvimento de novos lubrificantes e aditivos que possam melhorar o desempenho tribológico. A pesquisa em lubrificação deve focar na otimização da viscosidade, levando em consideração a interação entre a viscosidade, a temperatura e a pressão, para garantir que o lubrificante funcione eficientemente em uma ampla gama de condições operacionais (Kimura, 2010; Chiarello; Todt, 2019).

Na lubrificação, os valores de viscosidade dinâmica e cinemática são extremamente relevantes, pois influenciam diretamente a formação do filme lubrificante entre as superfícies em contato. Além disso, esses valores também são utilizados para calcular um parâmetro chamado índice de viscosidade (IV), que é uma medida da variação da viscosidade em relação à temperatura. Quanto maior o IV, menor será a variação da viscosidade com o aumento da temperatura. O índice de viscosidade é uma importante referência na escolha de lubrificantes, pois indica a estabilidade da viscosidade em diferentes condições de temperatura (Chiarello e Todt, 2019; Maru, 2003).

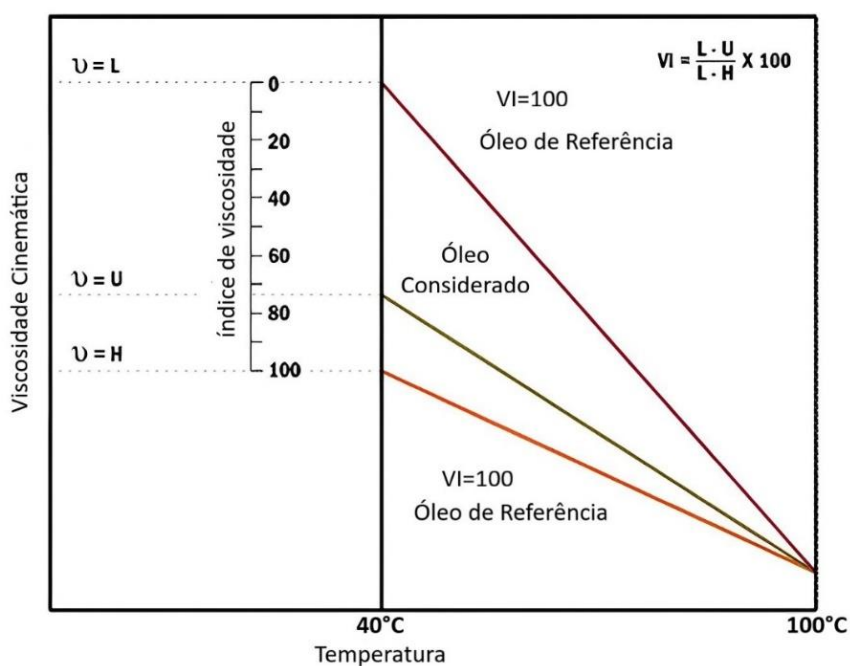
2.1.4.1 Índice de viscosidade

Normalmente, a viscosidade dos fluidos diminui com o aumento da temperatura. Uma propriedade fundamental dos óleos lubrificantes é o índice de viscosidade (IV), um parâmetro adimensional que quantifica a variação da viscosidade cinemática em função da temperatura. O IV é crucial para determinar a estabilidade da viscosidade do óleo em diferentes condições operacionais, fornecendo informações essenciais sobre seu desempenho como lubrificante (Kimura, 2010).

Um alto IV indica que a viscosidade do óleo sofre pouca variação com a temperatura, garantindo a manutenção de um filme lubrificante adequado em uma ampla faixa térmica. Em contrapartida, um baixo IV sugere que a viscosidade do óleo é menos estável em temperaturas elevadas, resultando na redução da espessura do filme lubrificante à medida que a temperatura aumenta (Karim e Shaharin, 2018).

A determinação do índice de viscosidade baseia-se na comparação da viscosidade cinemática do óleo em teste, medida a 40°C e 100°C, com a viscosidade de dois óleos de referência. Um desses óleos possui IV = 0, e o outro IV = 100, ambos apresentando a mesma viscosidade cinemática do óleo testado a 100°C. O cálculo do IV é realizado por meio de tabelas de referência específicas (ASTM, 2016). A Figura 4 ilustra esse procedimento.

Figura 4: Determinação do Índice de Viscosidade



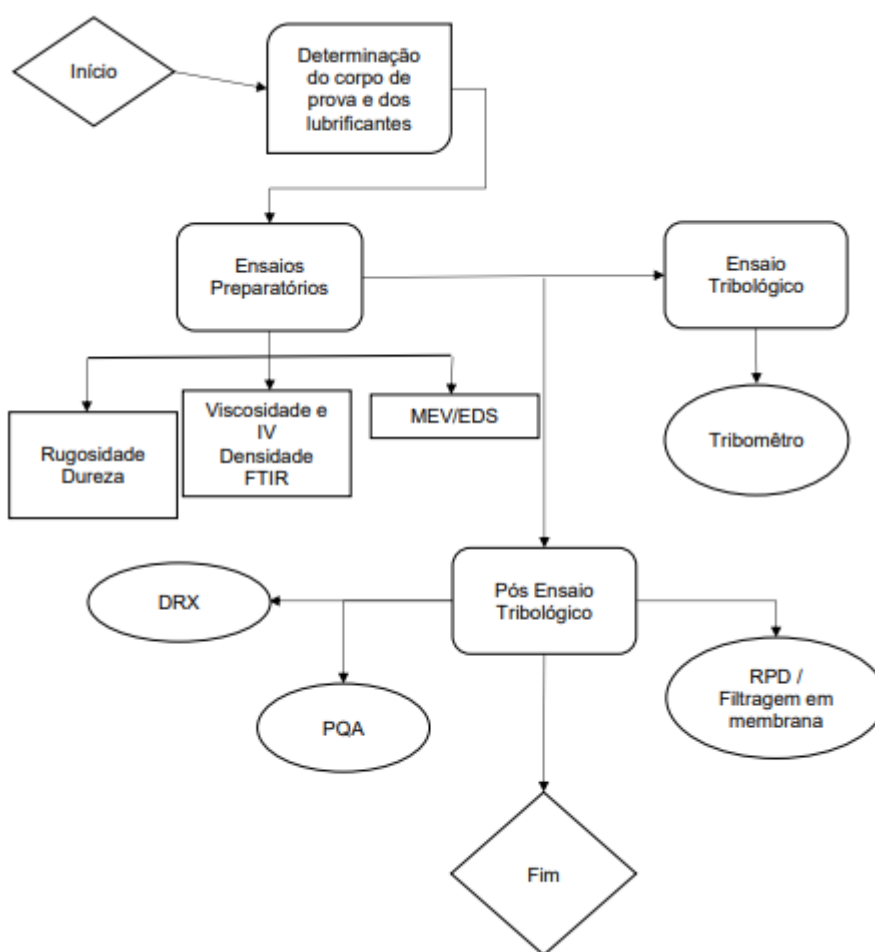
Fonte: Machinery (Adaptado).

Conforme ilustrado na Figura 4, um óleo com menor variação da viscosidade cinemática em função da temperatura apresentará um índice de viscosidade mais alto em comparação com um óleo cuja viscosidade varie mais significativamente na mesma faixa térmica (Kimura, 2010).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para alcançar objetivos definidos nesta pesquisa, foi essencial estabelecer condições experimentais rigorosas, caracterizar detalhadamente os materiais utilizados e definir procedimentos cuidadosamente selecionados para assegurar a precisão e confiabilidade dos resultados obtidos, conforme descrito na Figura 5.

Figura 5: Procedimento Metodológico.



Fonte: Autoria própria (2025).

Esses ensaios foram conduzidos em conformidade com os experimentos realizados por Silva (2023). Para alcançar esse objetivo, é essencial ter um entendimento aprofundado das condições de teste, da operação dos equipamentos necessários e das propriedades das amostras, incluindo o par tribológico, os tipos de óleos utilizados e os aditivos envolvidos.

3.1 DETERMINAÇÃO DO CORPO DE PROVA E DOS LUBRIFICANTES

3.1.1 Material do corpo de prova

No âmbito desta pesquisa, foram selecionados e utilizados materiais de aço e latão, adquiridos comercialmente. A Tabela 1 detalha as propriedades desses materiais, oferecendo uma visão abrangente de suas características físicas e mecânicas.

Tabela 1: Propriedades mecânicas dos materiais utilizados.

Corpo de Prova	Propriedades			
	Dureza (HRB)	Resistencia a Fadiga(ciclos)	Coeficiente de Atrito	Condutividade Térmica (w/mk)
Aço	95	5e6	0,5	52
Latão	23	2e6	0,19	104

Fonte: Autoria Própria (2025).

Após a seleção dos corpos de prova, iniciou-se a etapa de preparação, na qual foram empregadas técnicas e equipamentos adequados para assegurar que as amostras atendessem aos requisitos dos ensaios. Para isso, foram escolhidos dois tarugos, um de aço e outro de latão, conforme as especificações do estudo. Em seguida, as amostras passaram pelas etapas de fresamento, lixamento e polimento, processos fundamentais para a realização dos ensaios subsequentes. A Figura 6 apresenta os corpos de prova.

Figura 6: Corpos de Provas: discos e esferas.



Fonte: Autoria própria (2025).

3.1.2 Definição dos Lubrificantes

Para a realização dos ensaios tribológicos, foram selecionados três tipos de lubrificantes: os óleos vegetais de mamona e urucum, além do óleo mineral PNM55, avaliados com e sem a adição de nanopartículas de ZnO e ZnO/MoO₃. Para facilitar a identificação das condições experimentais de cada ensaio, foi estabelecido um sistema de nomenclatura que classifica, de forma clara e objetiva, os diferentes parâmetros analisados. Essa nomenclatura foi definida com base em quatro categorias principais: tipo de lubrificante, tipo de aditivo, par metálico e concentração do aditivo, de modo que cada letra representa uma característica específica do ensaio, conforme a Tabela 2.

Tabela 2: Classificação e nomenclatura dos ensaios.

Lubrificantes	Tipos de Aditivos	Par Metálico	%Aditivos
Mamona (A) Urucum (B) Pnm55 (C)	ZnO (A)	Latão x Aço (A)	0% (A)
	ZnO/ MoO ₃ (B)		
	ZnO + ZnO/ MoO ₃ (C)	Aço x Aço (B)	0,05% (B)

Fonte: Autoria própria (2025).

Além da definição dos lubrificantes, foi estabelecida a concentração de 0,05% de nanopartículas de ZnO e ZnO/MoO₃, com base na pesquisa de Silva (2023), que demonstrou a eficácia dessa proporção na melhoria das propriedades tribológicas. Essa concentração foi escolhida visando otimizar o desempenho dos lubrificantes, garantindo a estabilidade e preservando propriedades essenciais, como viscosidade e fluidez.

A definição precisa das massas de lubrificantes e de nanopartículas foi fundamental para avaliar o impacto dos aditivos no desempenho tribológico, evitando efeitos adversos decorrentes de concentrações excessivas. Para tanto, empregou-se balança analítica de alta precisão, configurada com porta antivetores e calibração interna, garantindo exatidão de $\pm 0,1$ mg. Para o cálculo das massas foi utilizado 20ml de lubrificantes. Conforme a Equação 4.

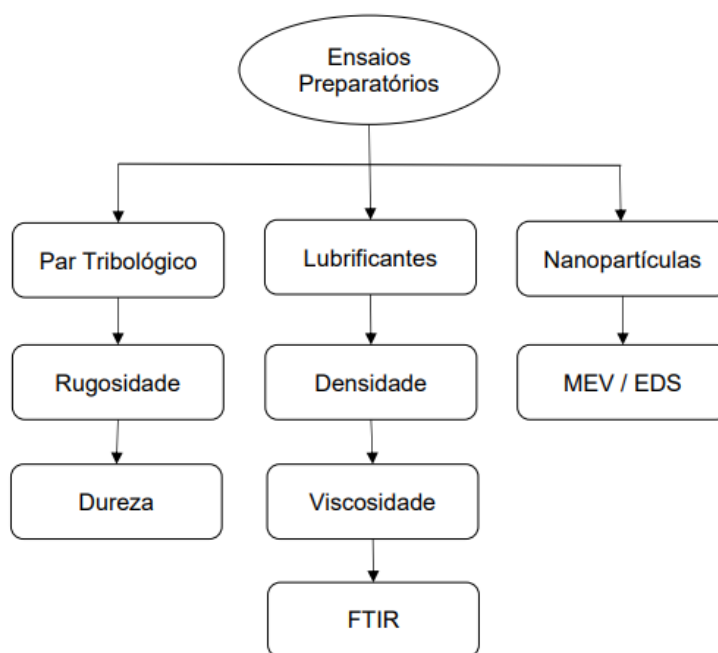
$$m = \rho \cdot v \quad (4)$$

Após o cálculo de massa dos lubrificantes e nanopartículas, foi feita a mistura de ambos os materiais formando uma mistura homogênea em um béquer e foram levadas ao banho ultrassônico por cerca de 30 min antes do ensaio tribológico.

3.2 ENSAIOS PREPARATÓRIOS

Nesta fase, os ensaios preparatórios foram realizados e organizados em grupos, com o objetivo de avaliar a precisão dos materiais primários utilizados. Esses grupos incluíram o par tribológico, lubrificantes e nanopartículas, conforme apresentado na Figura 7. Essa divisão permitiu uma análise mais detalhada do comportamento de cada material.

Figura 7: Etapas dos Ensaio Preliminares.



Fonte: Autoria própria (2025).

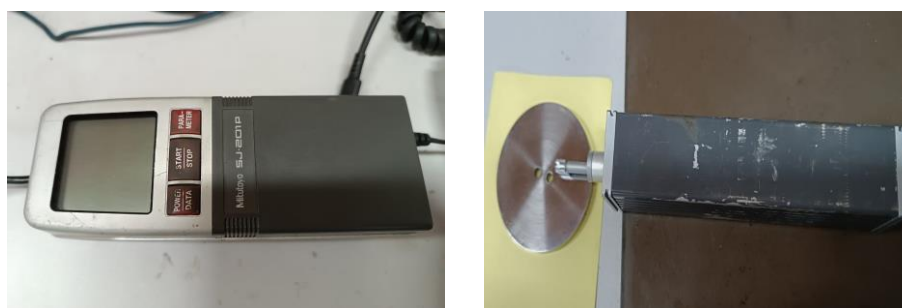
3.2.1 Par Tribológico

Neste grupo, os ensaios foram realizados para garantir a conformidade das superfícies para a investigação das especificações de atrito, desgaste e lubrificação, garantindo uma análise precisa dos aspectos tribológicos.

3.2.1.1 Rugosidade Superficial

Para garantir a padronização adequada das superfícies dos corpos de prova utilizados nos ensaios tribológicos, foram realizadas medições de rugosidade. Essa etapa é essencial para avaliar as condições superficiais antes dos testes de atrito e desgaste. As medições de rugosidade foram conduzidas utilizando o rugosímetro MITUTOYO SJ.201P, sendo um aparelho portátil de alta exatidão, por ser capaz de permitir diferentes parâmetros de rugosidade com base em padrões internacionais. O equipamento de última geração conta com um sistema de apalpador altamente sensível, que percorre toda a superfície do material. Este sistema é capaz de detectar variações mínimas na altura das micro-irregularidades da superfície, conforme ilustrado na Figura 8.

Figura 8: Equipamento de medição de rugosidade.



a) Equipamento

b) Medição da Rugosidade

Fonte: Autoria própria (2025).

Seguindo a metodologia descrita por Hobson (1986), o equipamento de medição utilizado fornece diferentes parâmetros de rugosidade, sendo eles R_a , R_q , R_y e R_z . Para cada corpo de prova, foram realizadas três medições para cada um desses parâmetros. O parâmetro R_a (rugosidade média aritmética) foi determinado pela média das distâncias entre as irregularidades da superfície. O parâmetro R_q (rugosidade média quadrática) corresponde à raiz quadrada da média dos quadrados das distâncias em relação à linha média da superfície. O parâmetro R_y (altura máxima de perfil) foi obtido pela medida vertical entre os pontos mais altos e mais baixos do perfil. Por fim, o parâmetro R_z (rugosidade total) foi calculado como a média das

diferenças entre os cinco pontos mais altos e os cinco pontos mais baixos em cada medição.

3.2.1.2 Ensaio de Dureza

O ensaio de dureza foi realizado, seguindo as normas ABNT NBR ISO 6508-3, 2019; E18-24, 2024, os corpos de prova foram cuidadosamente limpos antes da medição. Em seguida, foram posicionados no equipamento de ensaio de dureza Vickers. O penetrador foi então pressionado contra a superfície. O processo de medição começou com a aplicação de uma carga, mantida por um período de 15 segundos. Este procedimento foi repetido para todas as amostras submetidas ao ensaio. Para assegurar a precisão dos resultados, foram realizadas três medições em cada peça, com variação do ângulo de medição de 90°C.

3.2.2 Lubrificantes

Em relação aos lubrificantes utilizados nos ensaios, foram selecionados dois de bases distintas: um mineral, que contém aditivos anti-desgaste de extrema pressão em sua composição, e outro de base vegetal, isento desse tipo de aditivo.

3.2.2.1 Densidade

Para a verificação da densidade dos lubrificantes, foram utilizados dois equipamentos: um picnômetro e uma balança analítica. Na Figura 9, apresentada abaixo, são demonstrados os equipamentos utilizados.

Figura 9: Instrumentação na determinação da densidade.



a) Picnômetro



b) balança de precisão

Fonte: Autoria própria (2025).

Com base nos valores de massa do picnômetro, massa do líquido ensaiado e no volume padrão do picnômetro, foram realizadas cinco medições, a partir das quais foram calculadas as respectivas densidades dos lubrificantes.

3.2.2.2 Viscosidade e Índice de Viscosidade

Para a determinação da viscosidade, foi utilizado o viscosímetro Saybolt, essencial para avaliar a capacidade de resistência dos óleos lubrificantes. Na Figura 10 é apresentado esquematicamente o equipamento utilizado.

Figura 10: Equipamento Viscosímetro Saybolt



a) Equipamento Saybolt



b) Medição da viscosidade saybolt.

Fonte: Autoria própria (2025).

Para a realização do ensaio de viscosidade cinemática, foi necessário verificar as condições de operação do equipamento. Após ligá-lo, a temperatura de operação foi programada para 40°C e depois a 100°C. Em seguida, foram selecionados dois lubrificantes vegetais e um mineral para os testes, além de verificar o nível do líquido de aquecimento no reservatório, que, neste caso, foi preenchido com água.

O copo do equipamento foi preenchido com o óleo lubrificante, e, ao atingir 40°C, a temperatura do líquido de aquecimento foi confirmada com um termômetro para garantir que o óleo estivesse acima de 37,5°C. Após essa verificação, o ensaio foi iniciado, permitindo o escoamento do óleo. Para garantir a reprodutibilidade dos resultados, foram realizadas três medições de viscosidade para cada lubrificante a 40°C e depois a 100°C. Observou-se que os lubrificantes de maior viscosidade prolongaram a duração do experimento. A Tabela 3 apresenta os lubrificantes vegetais testados.

Tabela 3: Tipos de Lubrificantes Vegetais.

Lubrificantes	Origem	Base
Mamona (A)	Vegetal	Ácido Graxo
Urucum (B)	Vegetal	Ácido Graxo
PNM55 (C)	Mineral	Parafínico

Fonte: Autoria Própria (2025).

Quando o lubrificante testado ultrapassa o menisco do frasco de ensaio, a viscosidade é medida em segundos Saybolt Universal (SSU), que é a unidade fornecida pelo equipamento, e convertida para centiStokes (cSt).

3.2.2.2.1.1 Índice de Viscosidade

A determinação do índice de viscosidade (IV) foi realizada conforme a norma ASTM D2270 (2016), utilizando as medições do viscosímetro Saybolt em duas temperaturas padrão: 40°C e 100°C. Essa medida é fundamental para caracterizar o desempenho do lubrificante sob diferentes condições operacionais. O cálculo do IV foi

realizado com base nas viscosidades cinemáticas obtidas para cada lubrificante, conforme a equação 5.

$$IV = 100 \times \frac{L-U}{L-H} \quad (5)$$

onde:

- L e U = valores de referência obtidos em tabelas padronizadas;
- U = viscosidade cinemática do óleo em teste a 40°C;
- IV = índice de viscosidade.

Óleos com $IV > 100$, a equação de determinação é ajustada conforme especificado na norma ASTM D2270 (2016).

3.2.2.3 Espectroscopia de infravermelho (FTIR)

Para avaliar fatores como lubrificação, oxidação e resistência contra a ferrugem, foi realizada o ensaio de espectrometria de infravermelho. Para a realização deste ensaio, foi utilizado o espectrômetro FuidScan 1000 Oil conditions Monitoring, que opera com a técnica de espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), conforme mostrado na Figura 11.

Figura 11: Espectrômetro FuiScan 1000 oil.



Fonte: Autoria Própria (2025).

Esse equipamento permite a análise qualitativa e quantitativa dos compostos presentes nos óleos lubrificantes, fornecendo informações detalhadas sobre as alterações químicas resultantes do uso e degradação do fluido (Wearcheck, 2000). Possuindo um sistema automatizado, para detectar oxidação, aditivos, contaminantes por água entre outros.

Para a aplicação desta técnica, as amostras foram acondicionadas em recipientes distintos, devidamente identificados. Foram realizadas três medições para cada amostra, incluindo as amostras de referência, que correspondem aos lubrificantes sem adição de nanopartículas e sem submissão a ensaios, e, em seguida, as amostras que passaram pelos testes tribológicos.

A espectrometria de infravermelho foi utilizada para avaliar as modificações químicas nos lubrificantes ao longo do processo de degradação. Essa técnica permite identificar grupos funcionais presentes nos óleos e quantificar os compostos formados durante o uso.

3.2.3 Nanopartículas

Para avaliar o impacto das nanopartículas nas propriedades tribológicas, foi realizada a caracterização das nanopartículas de óxido de zinco (ZnO) e de óxido de zinco dopado com molibdênio (ZnO/MoO₃).

3.2.3.1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Para a caracterização das nanopartículas de ZnO e ZnO/MoO₃, foi utilizado o microscópio eletrônico de varredura (MEV), um instrumento que utiliza feixes de elétrons para gerar imagens de alta resolução. Esse equipamento é fundamental para analisar as morfologias, permitindo uma visualização detalhada da composição topográfica das nanopartículas.

O funcionamento do MEV se dá pela emissão de elétrons de um emissor, que são acelerados e focalizados em um feixe estreito. Esse feixe incide sobre a superfície da amostra, resultando na emissão de elétrons secundários, que são coletados por um detector. Os dados obtidos são processados para gerar imagens topográficas das superfícies. Além do MEV, utilizou-se a máquina Q150T para realizar o revestimento

por sputtering, que é feito com um banho de ouro. Na Figura 12, estão apresentados os equipamentos utilizados.

Figura 12: Instrumentação para análise de caracterização.



a) Equipamento MEV



b) Equipamento Q150T

Fonte: Autoria própria (2025).

Para a análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV), as nanopartículas de ZnO e ZnO/MoO₃ foram depositadas em fitas condutoras de carbono. Após a fixação, as amostras foram submetidas ao revestimento por *sputtering* na máquina Q150T, sem a necessidade de tratamento térmico prévio. Esse procedimento garantiu a condutividade adequada para o experimento, possibilitando a observação das características morfológicas das nanopartículas. A Figura 13 ilustra a preparação da amostra para o banho de ouro, seguida pela análise realizada por microscopia eletrônica de varredura (MEV).

Figura 13: Preparação e banho de ouro das nanopartículas.



a) Amostra em preparação



b) Amostra após banho de ouro

Fonte: Autoria própria (2025).

Para a caracterização das nanopartículas de ZnO e ZnO/MoO₃, analisadas por espectroscopia de dispersão de energia (EDS), acoplada ao microscópio eletrônico de varredura (MEV), permitindo a identificação e quantificação dos elementos químicos presentes nas nanopartículas.

3.3 ENSAIO TRIBOLÓGICO

Nesta parte do trabalho, busca-se avaliar o comportamento de desgaste, atrito e lubrificação utilizando o tribômetro Pin-On-Disk. Esse ensaio permite uma análise detalhada dos parâmetros tribológicos sob condições controladas, proporcionando uma compreensão abrangente do desempenho dos materiais testados.

3.3.1 Condição de Operação

Para o procedimento experimental de deslizamento, foram estabelecidas condições operacionais importantes, como o carregamento mecânico e três variações de lubrificantes (puros e aditivados com nanopartículas). Além disso, foram monitorados parâmetros, como o volume de lubrificante, a rotação do sistema, a força aplicada ao disco e o percurso total de desgaste. As condições específicas dos ensaios estão apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4: Especificações Operacionais dos Ensaio Tribológicos.

Parâmetro	Condição
Volume	20 ml
Rotação do sistema	240 rpm
Força aplicada	7,2 kg
Distância percorrida	20 km
Tempo	24 horas

Fonte: Autoria própria (2025).

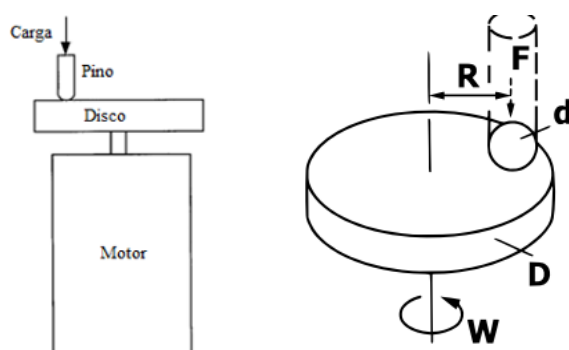
Além dessas condições determinadas, os discos foram pesados antes e depois do ensaio, garantindo maior precisão na quantificação de perda de massa. A pesagem

das amostras é fundamental, pois permite avaliar a eficiência da lubrificação e medir o desgaste com precisão.

3.3.2 Ensaio de Tribômetro

O tribômetro Pin-On-Disk utilizado nos ensaios é composto por um motor acoplado a um eixo, responsável por acionar a rotação do disco, e por um mecanismo de alavanca que integra um sistema de carregamento e um pino. Por meio dessa configuração, a amostra do pino é continuamente pressionada contra a superfície do disco em rotação, estabelecendo um contato deslizante controlado. A interação entre os corpos de prova resulta em uma faixa de desgaste circular, concentrada ao longo de uma trilha fixa. Durante o ensaio, é possível ajustar parâmetros das condições operacionais descritos na Tabela 4, permitindo uma padronização de ensaios. Esse comportamento visa avaliar o desempenho tribológico dos materiais sob condições secas ou lubrificadas, de modo a simular situações reais de operação. A disposição esquemática do equipamento pode ser observada na Figura 14.

Figura 14: Sistema de rotação do Pin-On-Disk.

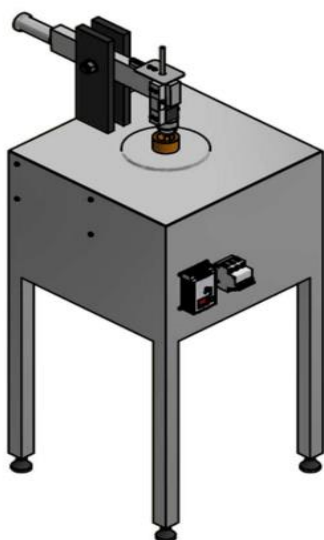


Fonte: ASTM G99 – 23, 2023(Adaptado).

Referenciado como um dos melhores equipamentos para a avaliação do desgaste e com alta reprodutibilidade em procedimentos experimentais, o tribômetro é equipado com um contador de ciclos e um sistema de desligamento ajustável de acordo com o número de revoluções programado. Além disso, conforme a norma ASTM G99-23 (2023), ele deve ser capaz de medir o coeficiente de atrito dos materiais por meio de uma célula de carga. A estrutura do equipamento utilizado neste trabalho

foi construída em aço, com as chapas unidas por meio de soldagem. Na Figura 15 (a e b), apresenta um projeto do equipamento e sua forma atual.

Figura 15: Bancada experimental *Pin-On-Disk*.



a) Projeto *Pin-On-Disk*



b) Equipamento *Pin-On-Disk*

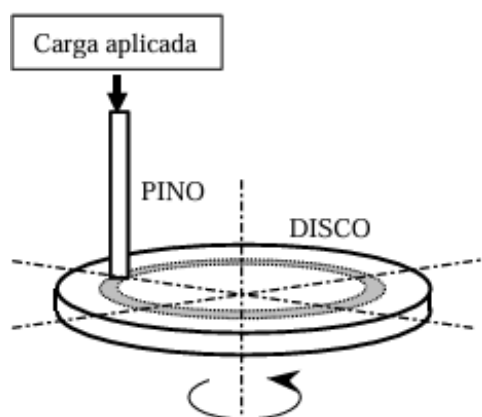
Fonte: Galvão, 2019 (Adaptado).

Como parte da instrumentação do tribômetro *Pin-On-Disk*, foi utilizado um microcontrolador arduino para monitorar o sistema, sendo responsável por acionar o motor e controlar a rotação do disco por meio de um inversor de frequência. Além disso, o arduino registra dados obtidos durante os ensaios, como a força aplicada e o coeficiente de atrito. Para a aquisição desses dados, foram empregados sensores infravermelhos e DHT11 para medir temperatura e umidade, o módulo HX711 para o processamento dos dados das células de carga, e um acelerômetro MPU6050 para capturar vibrações.

O experimento foi conduzido por meio de um tribômetro adaptado em 2019 por Galvão, localizado no Laboratório de Tribologia da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (UNESP). Sendo os parâmetros que regem e configuram o funcionamento do equipamento incluem a carga aplicada (N), a velocidade linear (m/s), a distância percorrida (m), a temperatura (°C) do pino e/ou do disco, além das condições ambientais, como temperatura ambiente, umidade relativa e o tipo de lubrificante utilizado. Esses fatores asseguram a consistência e a comparabilidade dos resultados entre diferentes ensaios e condições de teste. Com a utilização deste

equipamento foi possível quantificar o desgaste dos pares tribológicos, a resistência entre os materiais em contato e o coeficiente de atrito, por meio da carga aplicada verticalmente sobre o pino (Galvão, 2019; ASTM G99-23, 2023). O sistema de trilha de desgaste é ilustrado na Figura 16.

Figura 16: Trilha de desgaste Pin-On-Disk.



Fonte: Maru, 2003 (Adaptado).

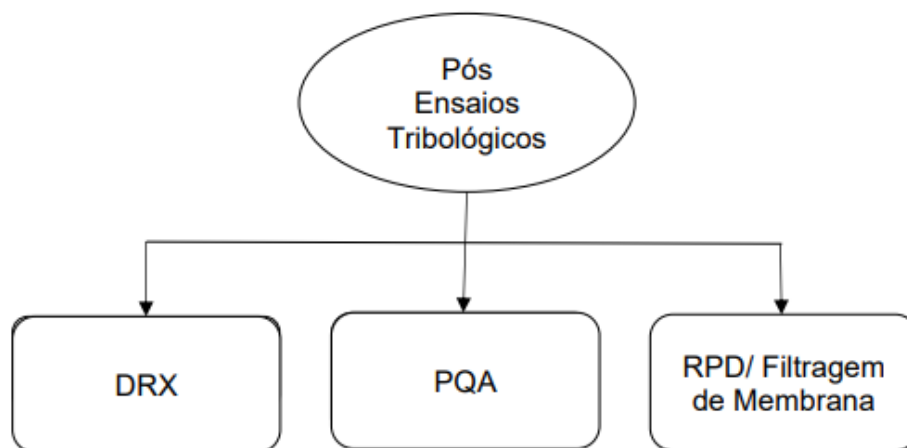
Para a realização dos ensaios, foram utilizados três discos de aço e três discos de latão, bem como seis esferas de aço, com diferentes lubrificantes e dois tipos distintos de nanopartículas. Os discos e as esferas foram preparados conforme as normas ASTM G99-23 (2023), e as condições de operação estão detalhadas na Tabela 4. Os corpos de prova foram cuidadosamente pesados em balança antes e após o experimento, permitindo a quantificação estática da perda de massa. No caso das esferas de aço, a pesagem foi realizada apenas no início do experimento, uma vez que o desgaste primário se concentraria nos discos. O lubrificante utilizado nos ensaios foi submetido a tratamentos específicos, com a adição de nanopartículas para avaliar o impacto delas nas propriedades tribológicas de superfície de contato como a redução de desgaste.

3.4 PÓS ENSAIO TRIBOLÓGICO

Após a conclusão dos ensaios tribológicos, foram empregadas técnicas consolidadas para avaliar os resultados das partículas das superfícies desgastadas, abrangendo a composição química, a microestrutura e as características, conforme

mostrado na Figura 17. Permitindo uma análise mais detalhada dos efeitos provocados pelos ensaios de deslizamento e melhor entendimento.

Figura 17: Pós ensaios tribológicos.



Fonte: Autoria própria (2025).

Além disso, após a realização dos ensaios no tribômetro, os dados coletados e armazenados por meio do Arduino foram tratados utilizando o software MATLAB. Esse processamento possibilitou a representação gráfica dos resultados, facilitando a comparação e a interpretação visual dos dados. Um exemplo disso são os gráficos do coeficiente de atrito, cujos valores foram capturados por sensores, registrados e compilados no Arduino, e posteriormente analisados no MATLAB para uma melhor apresentação dos resultados.

3.4.1 Espectrometria de raio X (DRX)

O aparelho utilizado nos experimentos foi o Espectrômetro de Raios-X Oxford X-Supreme (Figura 18). Esse equipamento emprega a refração de ondas de raios-X para identificar a quantidade (ppm) e o tipo de partículas presentes na amostra. O espectrômetro é capaz de detectar até 18 elementos diferentes da tabela periódica, proporcionando uma análise precisa da composição das amostras

Figura 18: Espectrômetro de raio X(DRX).

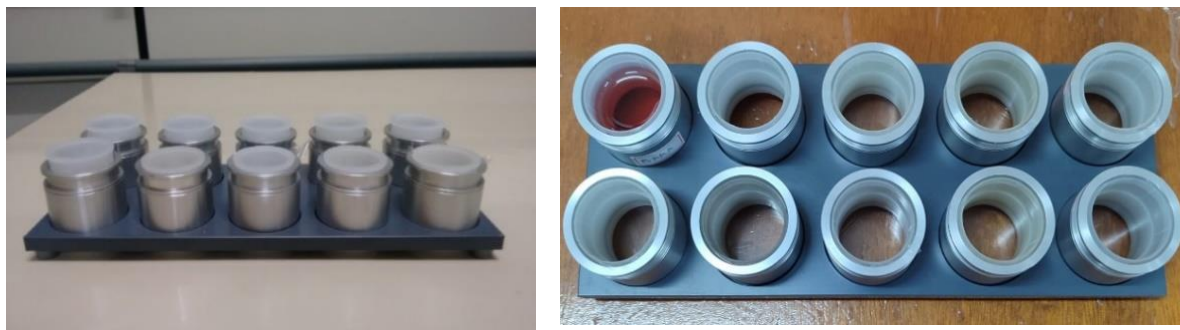


Fonte: Autoria própria (2025).

Este equipamento é responsável por identificar os elementos químicos presentes nas partículas, além de determinar a proporção de cada elemento na amostra. Sua precisão nas análises permite a identificação detalhada, sendo essencial no estudo do desgaste e da contaminação de lubrificantes, contribuindo para a prevenção de falhas mecânicas.

Para a realização do ensaio de espectrometria de raios-X, é necessário preparar adequadamente as amostras a serem analisadas. As amostras são agitadas para garantir a homogeneidade das partículas presentes, e 15 ml de cada amostra são separados para o ensaio. Esse procedimento assegura a precisão das análises e evita qualquer interferência nas medições dos elementos químicos. Os recipientes utilizados para acondicionar as amostras no espectrômetro podem ser visualizados na Figura 19.

Figura 19: Preparação para ensaio de espectrometria.

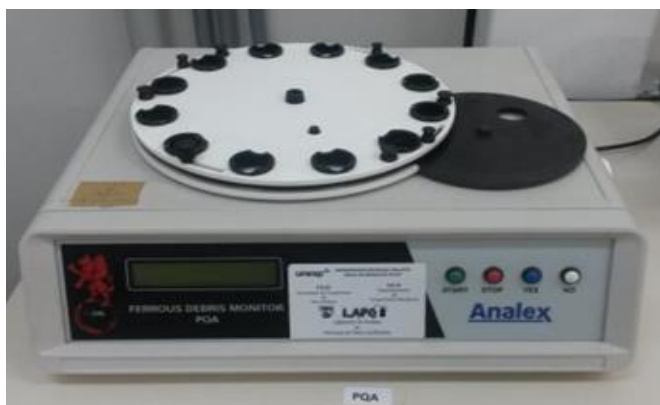


Fonte: Autoria própria (2025).

3.4.2 Monitor de partículas ferrosas (PQA)

O monitor de partículas ferrosas (*Particle Quantifier Analysis*) é um equipamento utilizado para indicar a tendência de concentração de partículas magnéticas em uma amostra de óleo lubrificante. Ele examina as amostras por meio de um campo indutivo, detectando a presença de materiais magnéticos e apresentando, como resultado, o índice de PQ. Esse índice está diretamente relacionado à quantidade e ao tamanho das partículas ferromagnéticas presentes no óleo. O equipamento é capaz de detectar partículas de desgaste normal, com tamanhos em torno de 1 mm. Na Figura 20, é mostrado o monitor de partículas utilizado nos experimentos.

Figura 20: Monitor de partículas ferrosas.



Fonte: Autoria própria (2025).

O equipamento utiliza duas bobinas, que respondem igualmente a variações de temperatura: uma bobina atua como sensor para a amostra, enquanto a outra serve como referência. Para realizar a análise, uma amostra de óleo contendo partículas ferromagnéticas é posicionada sobre o sensor. A presença dessas partículas causa um desequilíbrio entre as bobinas. Esse desequilíbrio gera um sinal elétrico, que é amplificado e exibido como o índice PQ, o qual está diretamente relacionado à massa de partículas ferromagnéticas presentes na amostra.

Antes de iniciar os ensaios com o PQA, é necessário configurar e calibrar o equipamento para garantir a qualidade e a estabilidade dos resultados. A calibração é realizada utilizando um padrão conhecido do índice PQ, o padrão 750. Após a calibração e configuração, os ensaios podem ser iniciados. Para a preparação das

amostras, o lubrificante é agitado para dispersar as partículas que possam ter se precipitado no fundo do recipiente. Em seguida, utilizando uma pipeta, uma porção de 2 ml é colocada em um recipiente plástico, conforme mostrado na Figura 21.

Figura 21: Amostras dos Lubrificantes pós – ensaio.



a) Mamona

b) Urucum

c) PNM 55

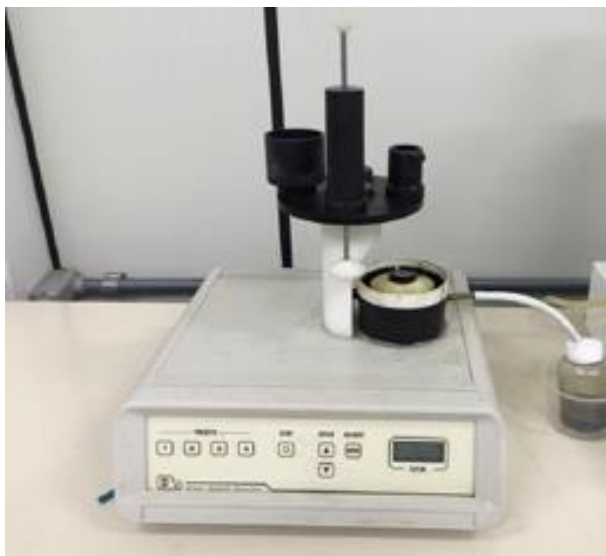
Fonte: Autoria Própria (2025).

Durante o ensaio, foram realizadas medições do índice PQ para cada amostra garantindo a consistência dos resultados. Este índice reflete a concentração de partículas de ferro e níquel presentes no lubrificante, fornecendo uma ferramenta útil para monitorar a evolução do desgaste, permitindo identificar se o quadro de desgaste está progredindo ou se permanece estável. O PQA é particularmente eficaz para identificar partículas ferrosas de tamanho superior a 5-10 μm , sendo uma tarefa difícil de alcançar com outras técnicas sem uma preparação prévia da amostra.

3.4.3 Depositador rotativo de partículas (RPD)

Com o auxílio de um depositador rotativo de partículas, foi avaliada a severidade do desgaste das amostras, possibilitando uma decisão precisa quanto à necessidade de intervenção para manutenção. O depositador rotativo de partículas (*Rotary Particle Depositor*) foi utilizado nos ensaios de ferrografia analítica. O equipamento opera através de forças magnéticas, gravitacionais e centrifugas para a separação de partículas magnéticas contidas nas amostras de lubrificantes sobre uma lâmina de vidro (ferrograma). O equipamento utilizado é ilustrado na Figura 22.

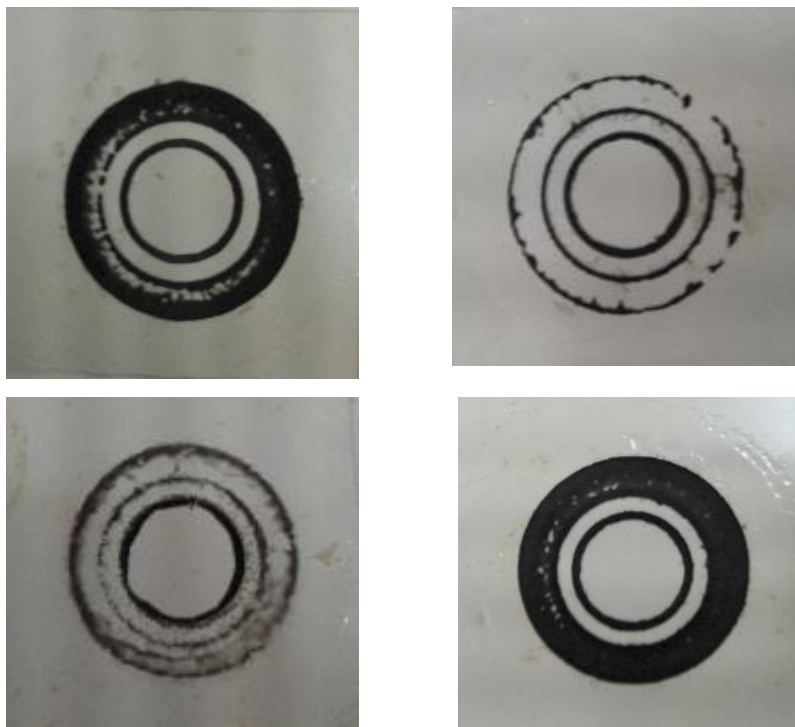
Figura 22: Depositador rotativo de partículas.



Fonte: Autoria própria (2025).

As partículas presentes no óleo são depositadas em três anéis concêntricos. As menores, variando de 1 a 10 μm , concentram-se nas extremidades, enquanto as de tamanho médio, entre 10 e 50 μm , ficam nos anéis externos. As maiores, com dimensões entre 50 e 100 μm , são depositadas nos anéis internos. Essa distribuição concêntrica facilita a análise de acordo com o tamanho e peso das partículas. O equipamento possui três diferentes velocidades de rotações começando pela de 70 até a 200 rpm. A figura 23 apresenta exemplos de ferrograma a serem analisados.

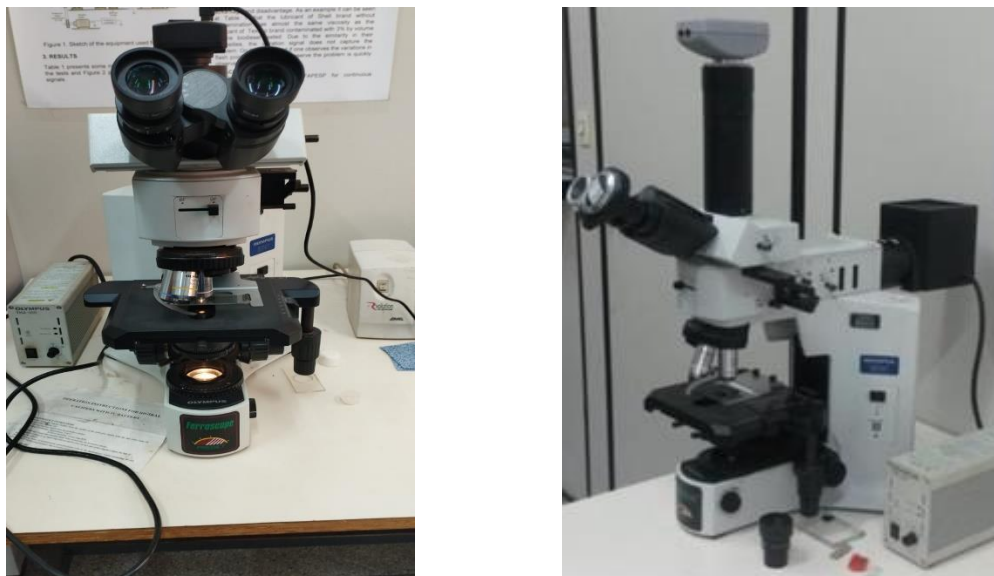
Figura 23: Anéis do ferrograma obtidos.



Fonte: Autoria própria (2025)

Após a preparação do ferrograma e das membranas, as partículas são observadas por meio de um microscópio óptico, analisando sua morfologia, tamanho e cor. Com base nessa observação, é realizada uma análise visual que permite identificar os tipos de desgaste e detectar contaminantes externos, como poeira e produtos de degradação do lubrificante. A ferrografia analítica é uma ferramenta eficaz para a manutenção preditiva. Na Figura 24, é apresentado o ferroscópio utilizado nos experimentos (marca: Olympus, modelo: BX-41).

Figura 24: Ferrosκόpio Olympus BX-41

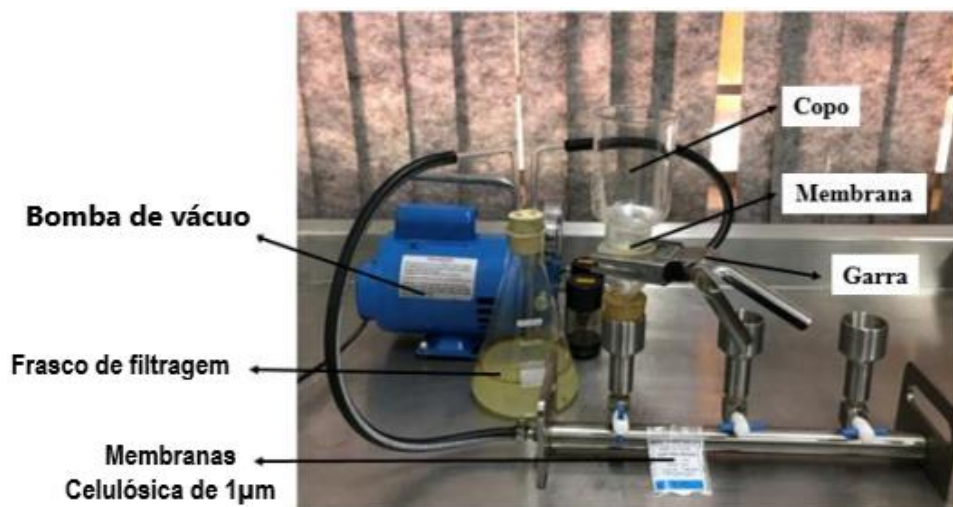


Fonte: Autoria própria (2025).

3.4.4 Filtragem por membrana celulósica

A técnica de filtragem por membrana celulósica foi aplicada às amostras com baixa concentração de partículas ferrosas, permitindo a separação e posterior análise das impurezas presentes no lubrificante. Essa técnica é grandemente utilizada para análises de detecção e dimensionamento de contaminantes sólidos em fluidos, neste caso foi utilizada na interação dos lubrificantes e as nanopartículas e partículas de desgaste, sendo essencial para o monitoramento do desgaste de componentes mecânicos. O equipamento utilizado é apresentado na Figura 25.

Figura 25: Sistema de filtragem de membrana.



Fonte: (Slavec, 2020).

Para a realização desta técnica, foram separadas as amostras que apresentaram baixas concentrações de partículas ferrosas. O solvente utilizado foi o hexano, para a filtragem foi utilizada membranas celulósicas de 1µm de porosidade.

As amostras foram diluídas em hexano e transferidas para um copo de vidro, em seguida a solução (amostra + hexano) foi submetida ao processo de filtragem onde amostras mais densas que incluíam mais quantidades de partículas demorou mais tempo na filtragem do que as que possuíam menores partículas. Após a filtragem completa as membranas contendo partículas foram cuidadosamente retiradas e armazenadas em um dessecador para eliminação do solvente. Assim que o solvente foi completamente evaporado, as amostras foram analisadas em um microscópio, utilizando o mesmo processo de observação empregado no ensaio de RPD.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, será apresentada a análise comparativa dos resultados obtidos, conforme o procedimento experimental descrito no Capítulo 4. A apresentação dos resultados segue o mesmo formato utilizado por Silva (2023), facilitando a comparação e a interpretação dos dados. Na Tabela 5, estão descritas as etapas de apresentação dos resultados, permitindo uma visão organizada e sistemática do processo de análise.

Tabela 5: Apresentação de resultados.

Experimento	Método	Componentes
Rugosidade	Ensaio preparatório	Par tribológico
Dureza	Ensaio preparatório	Par tribológico
Viscosidade e IV	Ensaio preparatório	Lubrificantes
Densidade	Ensaio preparatório	Lubrificantes
Espectrometria – FTIR	Ensaio preparatório	Lubrificantes
Microscopia – MEV/ EDS	Ensaio preparatório	Nanopartículas
Coeficiente de Atrito	Ensaio tribológico	-
Desgaste variação de Massa	Ensaio tribológico	-
Espectrometria (DRX)	Pós ensaio tribológico	-
Índice de PQ	Pós ensaio tribológico	-
Ferrografia Analítica	Pós ensaio tribológico	-

Fonte: Autoria própria (2025).

4.1 PROPRIEDADES DO PAR TRIBOLÓGICO

As propriedades tribológicas obtidas dos materiais utilizados são descritas a seguir.

4.1.1 Rugosidade superficial

Na Tabela 6, estão apresentadas as medições das rugosidades médias encontradas. Essas medições são fundamentais para compreender o comportamento do material em contato com outro, influenciando diretamente no desempenho tribológico, incluindo fatores como desgaste e atrito.

Tabela 6: Medições de rugosidade superficial.

Material	Rugosidade Superficial (μm)
	Ra
Aço	0,24
Latão	0,18

Fonte: Autoria própria (2025).

Com base nas medições de rugosidade superficial, pode-se verificar que valores mais baixos de rugosidade, como o Ra, correspondem a superfícies mais lisas, enquanto valores mais elevados representam superfícies mais ásperas influenciando diretamente nos valores de coeficiente de atrito e desgaste (Ghosh, *et al.*, 2019).

4.1.2 Dureza

Na Tabela 7, são apresentados os valores de dureza obtidos na escala Vickers para cada material testado.

Tabela 7: Medições de dureza Vickers.

Material	Dureza HV
Latão	116,6
Aço	223

Fonte: Autoria própria (2025).

Os resultados revelaram que o aço possui uma dureza significativamente superior em comparação ao latão, evidenciando sua maior resistência a deformações permanentes e sua adequação para aplicações que exigem elevada resistência

mecânica. Essas diferenças têm implicações diretas em suas aplicações práticas, sendo o aço com sua elevada dureza, é ideal para componentes estruturais e ferramentas sob altas cargas e condições de desgaste severo. Por outro lado, o latão, por possuir menor dureza, sendo propício ao desgaste quando entra em contato com materiais mais duros, como o próprio aço.

4.2 CARACTERÍSTICAS DOS LUBRIFICANTES

Na Tabela 8 estão apresentadas as respectivas massas dos lubrificantes e das nanopartículas calculadas com concentração de 0,05%. A combinação desses materiais é essencial para a potencialização do mecanismo de redução de atrito e desgaste, assegura a estabilidade da suspensão e permite a formação de filmes protetores nanométricos de modo uniforme.

Tabela 8: Massa de óleos lubrificantes e aditivos.

Lubrificantes	Massa do Lubrificante(g)	Massa de Nanopartículas(g)
Mamona	19,2	0,0096
Urucum	18,3	0,0092
PNM55	17,5	0,0087

Fonte: Autoria própria (2025).

A partir da utilização das técnicas de ensaio de viscosidade e densidade, é possível determinar o comportamento dos lubrificantes em relação às suas propriedades tribológicas. Esses ensaios permitem uma análise aprofundada do desempenho dos lubrificantes em condições de atrito e desgaste.

4.2.1 Viscosidade

Os ensaios de viscosidade realizados com o equipamento Saybolt permitiram determinar a viscosidade cinemática de cada lubrificante a 40°C e 100°C. Com base nos resultados obtidos, foi determinado o índice de viscosidade de cada lubrificante.

Na Tabela 9, são apresentadas as viscosidades e índices de viscosidade obtidos dos três lubrificantes, juntamente com sua origem e base. Com base nos

dados adquiridos, é possível destacar que a viscosidade influencia diretamente a formação da camada lubrificante, enquanto o IV está relacionado à estabilidade do lubrificante sob diferentes condições de temperatura.

Tabela 9: Viscosidades dos lubrificantes ensaiados.

Lubrificantes	Origem	Base	Viscosidades		Índice de Viscosidade (IV)
			40° cst	100°cst	
Mamona	Vegetal	Ácido Graxo	257,02	20,67	94,7
Urucum	Vegetal	Ácido Graxo	32,69	8,58	247,5
PNM 55	Mineral	Parafínico	55,37	10,53	193

Fonte: Autoria própria (2025).

As medições de viscosidade e índice de viscosidade revelam diferenças significativas que impactam diretamente as propriedades tribológicas e suas aplicações. O óleo de mamona, com a maior viscosidade e um IV moderado, oferece maior resistência ao fluxo, favorecendo a formação de uma película lubrificante espessa, essencial para proteção em condições de alta pressão. De acordo com Gonçalves *et al.*, (2024) este óleo possui alta viscosidade o que o torna viável em diversas aplicações de engenharia. Em contrapartida, o óleo de urucum, com a menor viscosidade e um IV elevado, sugere menor resistência ao fluxo, mas melhor estabilidade térmica, o que pode ser vantajoso em temperaturas mais altas, embora sua capacidade de proteção em situações de alta carga seja limitada. O PNM55, com comportamento intermediário em termos de viscosidade e IV, combina boa estabilidade térmica e fluidez moderada, tornando-o uma opção equilibrada, resistente ao desgaste e adequada para diversas condições operacionais.

4.2.2 Densidade

Por meio da realização do ensaio de picnômetro, foram determinadas as densidades dos lubrificantes. Essa avaliação é crucial, pois permite calcular a quantidade de nanopartículas a serem adicionadas a cada lubrificante. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 10, onde se observa que o lubrificante de

mamona possui a maior densidade, enquanto o óleo PNM55 apresenta a menor densidade.

Tabela 10: Densidade dos lubrificantes ensaiados.

Lubrificantes	Densidade (g/cm³)
Mamona	0,960
Urucum	0,915
PNM55	0,873

Fonte: Autoria própria (2025).

Com base na análise dos resultados adquiridos, observa-se relevância para compreender os efeitos dos fluidos nas aplicações tribológicas. O lubrificante de mamona apresentou valor de densidade maior, demonstrando ser satisfatório em situações que exijam maior proteção de desgaste formando uma película robusta. Além de possuir capacidade de preenchimento das superfícies de contato, reduzindo o atrito e aumentando a eficiência do lubrificante devido à alta densidade.

O lubrificante de urucum, por sua vez, possui uma densidade intermediária, o que proporciona um equilíbrio entre a capacidade de transporte de nanopartículas e a fluidez do fluido. Embora sua capacidade de suspender aditivos seja inferior à do lubrificante de mamona, ele pode ser eficiente em aplicações onde uma densidade mais baixa é desejável para reduzir o atrito e melhorar as condições de lubrificação, especialmente em cenários que envolvem menor pressão ou carga.

Por outro lado, o lubrificante mineral PNM55, com a menor densidade entre os fluidos estudados, apresenta uma capacidade de suspensão de nanopartículas reduzida. No entanto, sua maior fluidez o torna vantajoso em operações que requerem baixa resistência ao fluxo, como em condições de baixa carga ou velocidade, nas quais é crucial minimizar o atrito. Vale destacar que a capacidade de lubrificação não é diretamente comprometida pela menor densidade, mas essa característica pode exigir ajustes nas condições operacionais para otimizar o desempenho tribológico.

4.2.3 Espectroscopia de infravermelho (FTIR)

Na Tabela 11, são apresentados os resultados médios de FTIR, incluindo a oxidação e a quantidade de partículas de água presentes em cada lubrificante, tanto

na sua forma pura quanto após o ensaio tribológico. Os valores obtidos para os lubrificantes vegetais são aproximadamente 90 vezes maiores do que os do lubrificante mineral, indicando uma maior degradação (Silva, 2023).

Tabela 11: Resultados de FTIR e de partículas de água nos lubrificantes sem adição de nanopartículas.

Lubrificantes	Oxidação (abs/m)	Água (ppm)
AAAA Puro	109,6	22294
BAAA Puro	101,1	1505
CAAA Puro	1,4	61
AAAA em uso	76,77	12103
BAAA em uso	100,7	1461
CAAA em uso	1,2	53,7

Fonte: Autoria Própria (2025).

Podemos observar na Tabela 11, que os lubrificantes vegetais apresentam altos valores de oxidação e maior presença de partículas de água, enquanto o lubrificante mineral exibe baixos níveis desses parâmetros, tanto em sua forma pura quanto após o uso, indicando menor degradação. Quando submetidos a altas temperaturas e pressões, os compostos orgânicos presentes nos lubrificantes são parcialmente oxidados pela presença de oxigênio, o que pode reduzir a vida útil do motor (Pereira, 2015), e impactar diretamente o desempenho dos lubrificantes em aplicações práticas.

4.3 CARACTERIZAÇÃO DAS NANOPARTÍCULAS

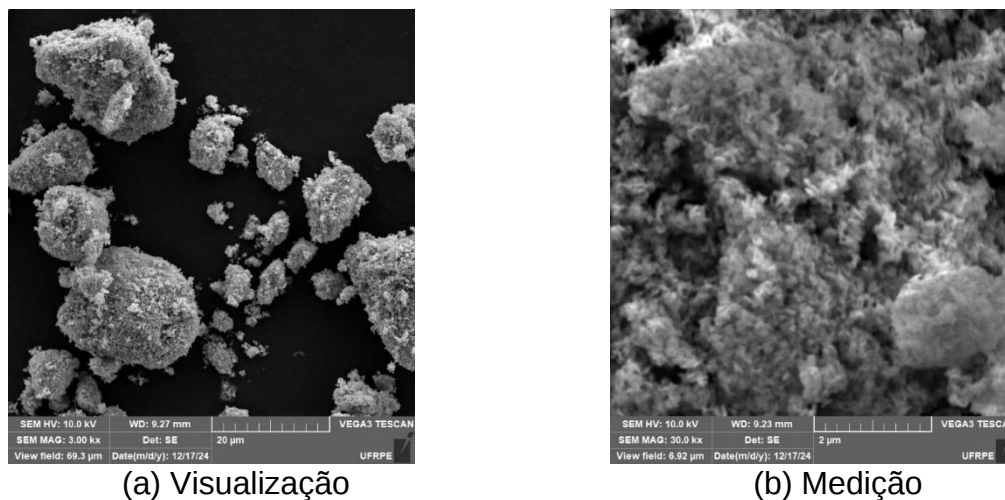
Neste tópico são apresentados os resultados da espectroscopia por energia dispersiva (EDS) e microscópio eletrônico de varredura (MEV) das nanopartículas de óxido de zinco (ZnO) e óxido de zinco dopado de molibdênio (ZnO/MoO₃).

4.3.1 Análise MEV/EDS das nanopartículas de ZnO

A Figura 26 apresenta a micrografia das nanopartículas de ZnO obtida por MEV, permitindo a análise de sua distribuição, tamanho e morfologia, além da identificação de possíveis aglomerações e da homogeneidade das partículas. Na

Figura 27, é exibido o histograma da distribuição dos tamanhos médios das partículas, enquanto a Figura 26 apresenta a análise de EDS das nanopartículas de ZnO sem tratamento térmico.

Figura 26: Análise morfológica da NPs de ZnO.

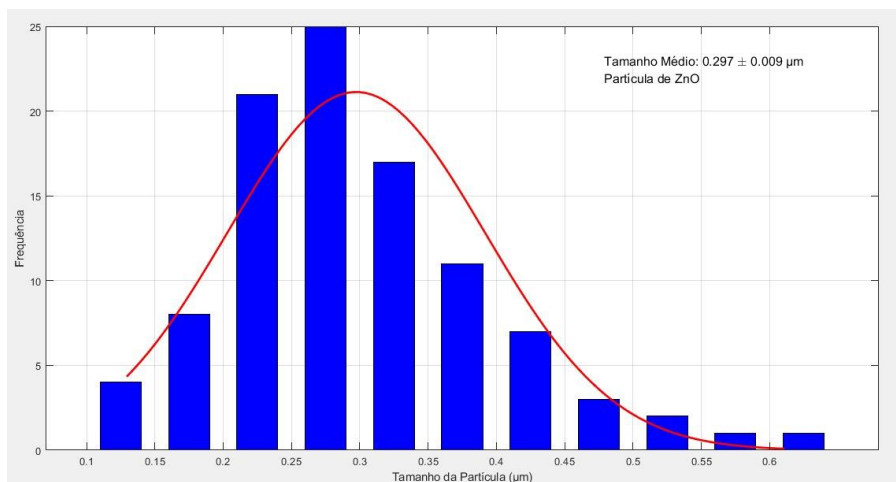


Fonte: Autoria Própria (2025).

A partir da Figura 26, é possível observar micrografias com morfologia irregular, além da presença de aglomerados de partículas com coloração branca (Singh *et al.*, 2021). A variação na morfologia das nanopartículas, está aliada ao processo de síntese que ocasionou uma distribuição eficiente de formas, influenciando diretamente nas propriedades tribológicas e a dispersão, uma vez que a amostra analisada não passou por tratamento térmico.

Além disso, observa-se uma variação na morfologia das nanopartículas, com predominância de partículas esféricas, mas também a presença de estruturas alongadas ou em formatos de bastões e flores (Singh *et al.*, 2021). Essas diferentes formas podem influenciar diretamente as propriedades do material, sendo benéficas para aplicações que exigem condutividade elétrica e boa dispersão em fluidos. Para complementar essa análise, a Figura 27 apresenta um histograma que fornece uma distribuição quantitativa dos tamanhos das nanopartículas.

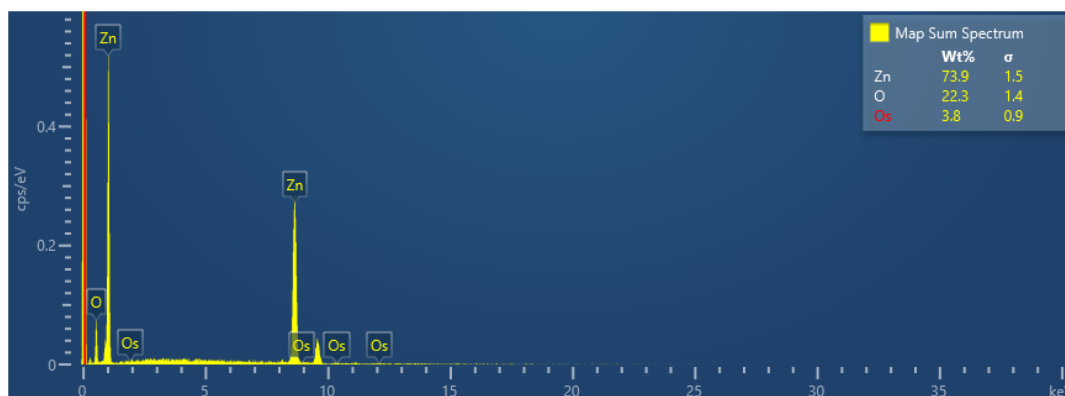
Figura 27: Histograma de análise quantitativa de NPs de ZnO.



Fonte: Autoria Própria (2025).

Na Figura 27, observa-se uma distribuição de tamanhos de partículas médias de $0,297 \pm 0,009 \mu\text{m}$, concentradas principalmente na faixa entre $0,2$ e $0,4 \mu\text{m}$. Embora esse valor médio seja consideravelmente superior aos tamanhos tradicionalmente previstos para nanopartículas ($< 0,1\mu\text{m}$), conforme destacado por Krishnaswamy e Orsat (2017), é possível considerar que essas dimensões maiores podem favorecer o desempenho na formação de películas protetoras e na redução do atrito entre as superfícies, contribuindo para a diminuição do desgaste. Na Figura 28, é apresentado o ensaio de EDS evidenciando componentes químicos presentes nas nanopartículas de ZnO.

Figura 28: Análise de EDS de NPs de ZnO.



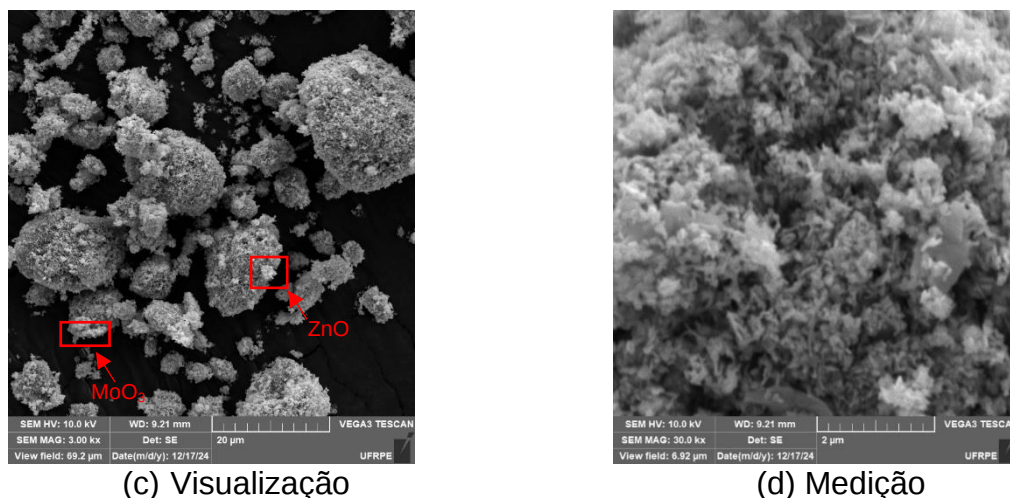
Fonte: Autoria Própria (2025).

Na Figura 28, a análise de EDS confirma a presença de Zn e O na composição das nanopartículas, evidenciada pelos altos picos de Zn (73,9%) e O (22,3%). Indicando a formação de óxido de zinco, independentemente de sua proporção de oxigênio inferior à estequiometria ideal do ZnO, podendo estar associada a variações na estrutura das partículas, imperfeições cristalinas ou limitações na técnica de EDS para a detecção de elementos leves.

4.3.2 Análise MEV/EDS das nanopartículas de ZnO/MoO₃

A Figura 29 revela detalhes interessantes sobre a morfologia da junção de dois materiais diferentes na forma de óxidos. Para analisar o tamanho das nanopartículas, é apresentado na Figura 30 um histograma, enquanto a Figura 31 exibe a análise de EDS das nanopartículas de ZnO/MoO₃.

Figura 29: Análise morfológica da NPs de ZnO/MoO₃.



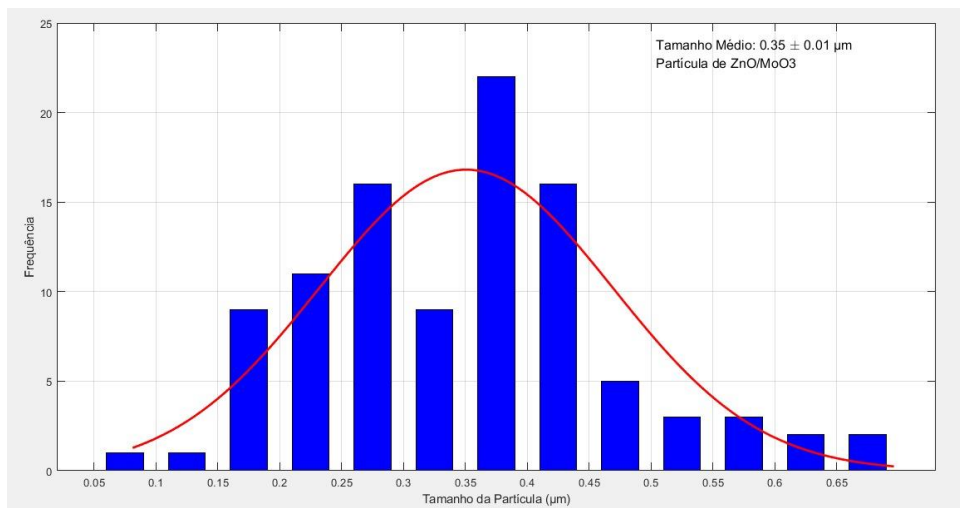
Fonte: Autoria Própria (2025).

Conforme a Figura 29, a micrografia das nanopartículas de ZnO/MoO₃ apresenta semelhanças com as das NPs de ZnO, porém com diferenças significativas em sua microestrutura. Essas variações resultam em alterações no tamanho das partículas, na rugosidade da superfície e na formação de aglomerados, fatores que podem influenciar diretamente suas propriedades físico-químicas e tribológicas (Santos-Beltrán *et al.*, 2021).

Como complemento à análise morfológica, a Figura 30 apresenta o histograma da distribuição de tamanhos das nanopartículas de ZnO/MoO₃, permitindo uma

avaliação quantitativa da dispersão granulométrica e auxiliando na compreensão da influência da dopagem com MoO_3 na estrutura das partículas.

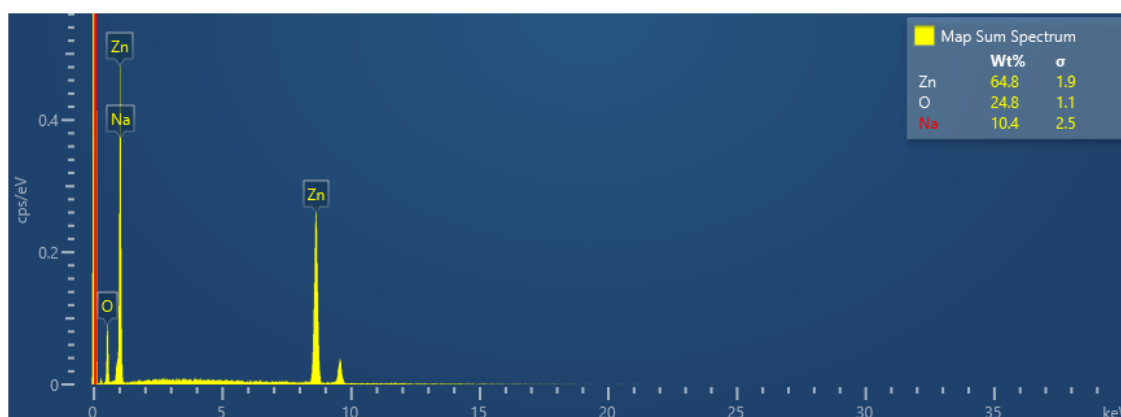
Figura 30: Histograma de análise quantitativa de NPs de ZnO/MoO_3 .



Fonte: Autoria Própria (2025).

Nota-se na Figura 30 que as nanopartículas de ZnO/MoO_3 apresentam tamanho médio de $0,35 \pm 0,01 \mu\text{m}$, com concentração predominante na faixa de 0,3 a $0,45 \mu\text{m}$, o que caracteriza uma dispersão ampla em relação ao tamanho médio. Assim como observado anteriormente para as nanopartículas de ZnO , o tamanho médio das partículas dopadas com MoO_3 também é superior ao esperado para nanopartículas ($<0,1 \mu\text{m}$), o que pode estar relacionado ao processo de aglomeração, fenômeno frequentemente reportado na literatura para nanopartículas de óxidos metálicos. Na Figura 31, é apresentado resultados de composição das NPs de ZnO/MoO_3 .

Figura 31: Análise de EDS de NPs de ZnO/MoO_3 .



Fonte: Autoria Própria (2025).

Os resultados da análise de EDS indicam a predominância de Zn (64,8%) e O (24,8%), sugerindo a formação do óxido de zinco como o principal componente das nanopartículas. A redução na concentração de Zn, em comparação à análise das NPs de ZnO puro, pode estar relacionada à incorporação do MoO_3 , o que sugere uma modificação na estrutura elementar e na estequiometria do material (Santos-Beltrán *et al.*, 2021).

Além disso, a detecção de Na (10,4%) indica a presença de impurezas, possivelmente originadas do processo de síntese ou encapsulamento, o que pode influenciar nas propriedades físico-químicas das nanopartículas.

4.4 DESEMPENHO DO ENSAIO TRIBOLÓGICO

Nesta seção, serão apresentados os resultados do desempenho tribológico dos materiais analisados, focando em duas variáveis de interesse, sendo o coeficiente de atrito e desgaste, com a utilização do tribômetro (*Pin-On-Disk*). Essa análise tribológica permite a compreensão dos resultados do ensaio com ou sem a incorporação de nanopartículas, buscando avaliar a eficácia dos lubrificantes ensaiados.

4.4.1 Coeficiente de atrito

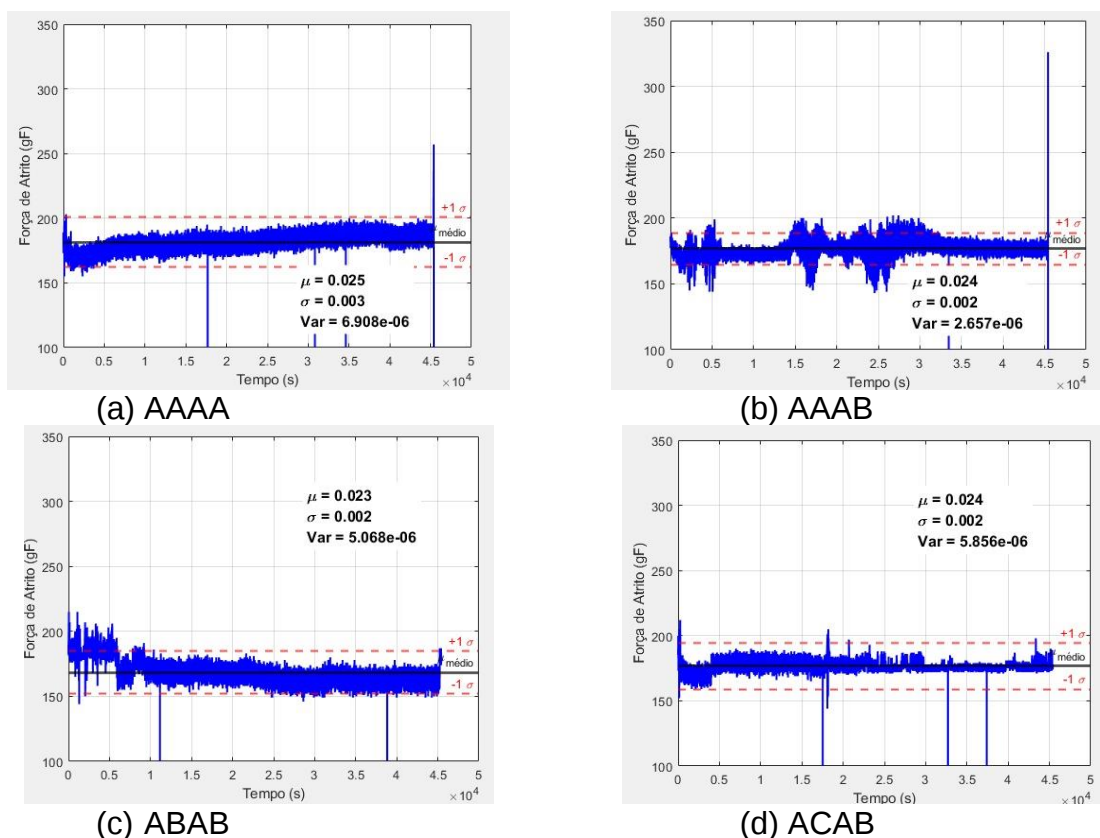
Os resultados de cada subseção foram organizados de acordo com o tipo de lubrificante utilizado, sendo apresentados na seguinte ordem: lubrificantes vegetais de mamona e urucum, seguidos pelo lubrificante mineral PNM55.

4.4.1.1 Análise de coeficiente de atrito dos lubrificantes de mamona.

Os gráficos apresentados nas Figuras 32 e 33, ilustram a variação do coeficiente de atrito no decorrer do tempo durante todo ensaio, proporcionando uma visualização precisa das interações entre as superfícies metálicas.

Figura 32: Variação do coeficiente de atrito com relação ao tempo de ensaio do par

tribológico Latão x Aço.

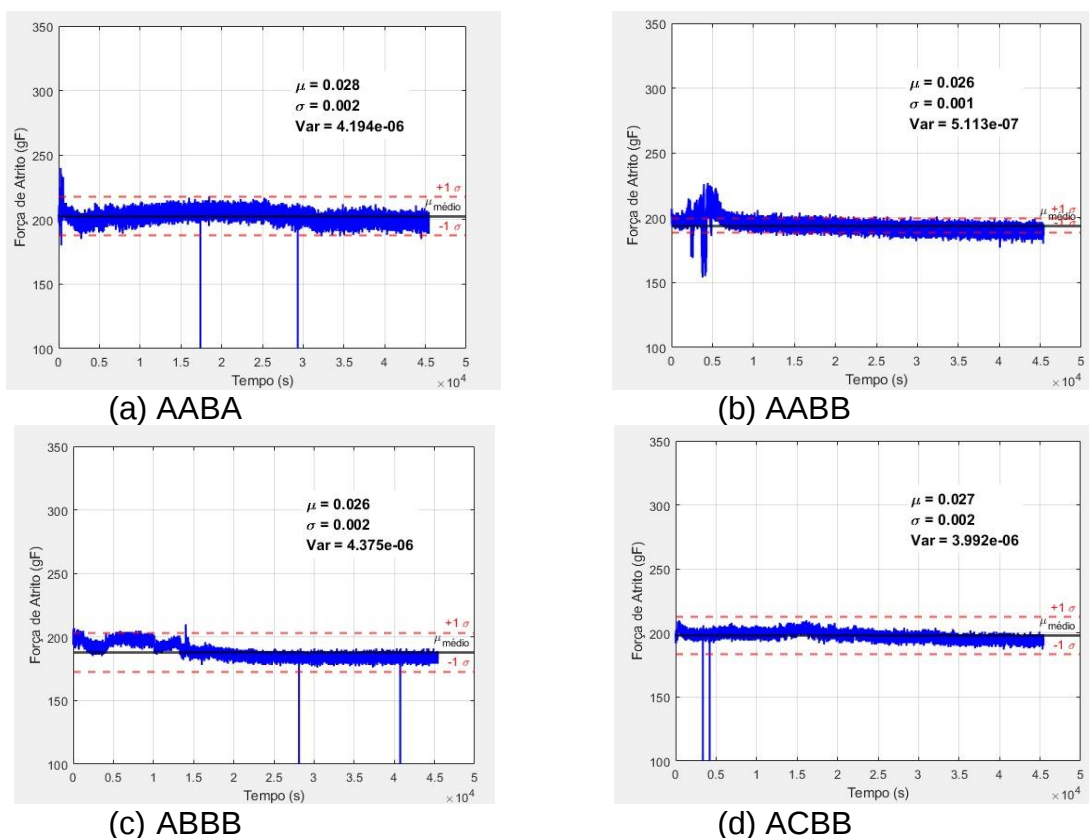


Fonte: Autoria própria (2025).

A análise dos gráficos revela uma variação do coeficiente de atrito ao longo do tempo, caracterizada pela presença de picos seguidos de fases de estabilização. Essas oscilações, relativamente pequenas, variam entre 0,023 e 0,025, o que sugere a formação de uma camada protetora de desgaste, influenciada pelas propriedades dos materiais das superfícies em contato. De acordo com o estudo de Pirro *et al.*, (2017), há uma relação direta entre a redução do coeficiente de atrito e a eficiência da lubrificação. Dessa forma, pode-se salientar que a presença do lubrificante contribui significativamente para a diminuição do atrito, uma vez que promove a formação de uma película lubrificante entre as superfícies de latão e aço, reduzindo o contato direto entre os materiais. Outro fator que podemos observar nos gráficos são as faixas vermelhas limitando a variação do coeficiente de atrito, identificando valores dentro e fora da faixa de desvio padrão, sendo os de fora considerados eventos transientes e anômalos durante o ensaio como trepidação da máquina, desgaste localizado e micro trincas, além dos ruídos no sensoramento.

Figura 33: Variação do coeficiente de atrito com relação ao tempo de ensaio do par

tribológico Aço x Aço.



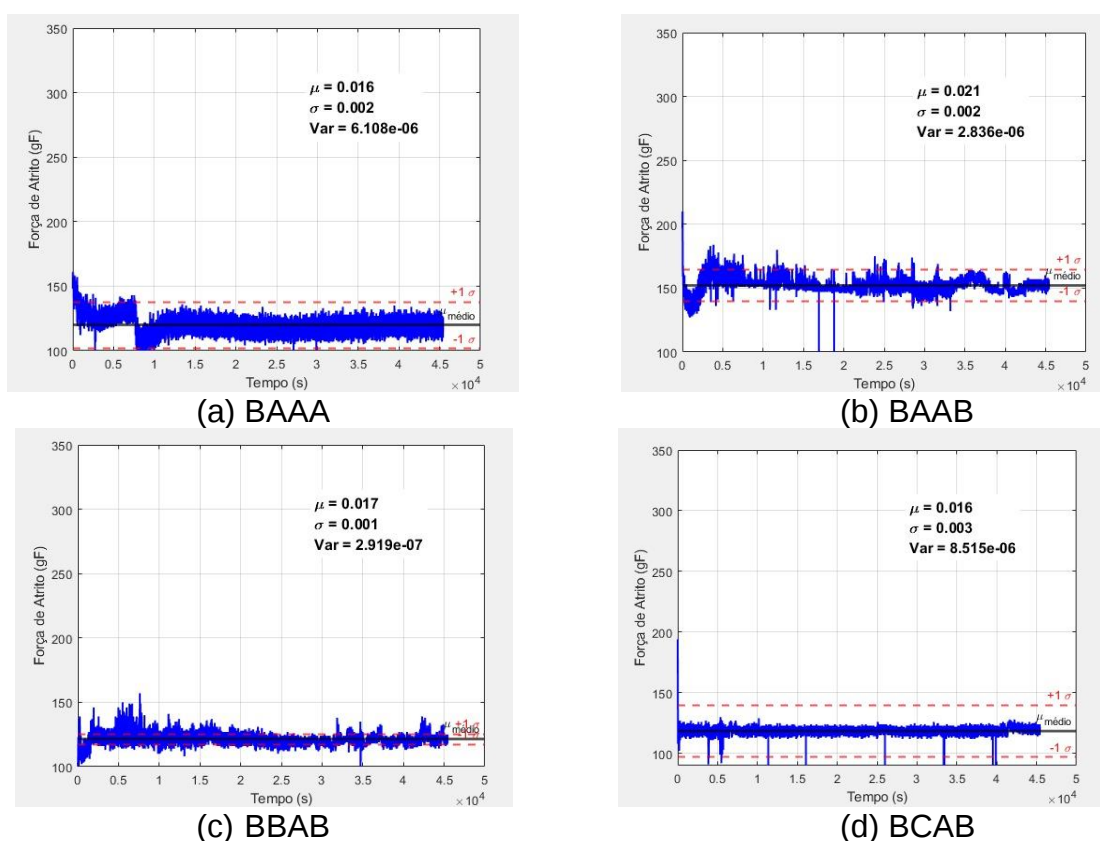
Fonte: Autoria própria (2025).

Como evidenciado nos gráficos apresentados na Figura 33, observa-se uma variação modesta entre 0,026 e 0,028, sugerindo uma resposta positiva da lubrificação na redução do atrito, além de apresentarem desvio padrão na faixa de 0,010 e 0,020, representando um comportamento significativamente estável, típico de pares metálicos iguais. No entanto, esses resultados indicam uma tendência de aumento no coeficiente de atrito quando comparado ao par tribológico latão x aço. Esse comportamento pode ser explicado pelo fato de que o contato entre duas superfícies metálicas idênticas gera maior atrito devido à adesão entre elas, conforme destacado por Hutchings e Shipway (2017). Tais resultados ressaltam a eficácia da lubrificação na diminuição do atrito e do desgaste, evidenciando a importância da formação de uma camada de filme lubrificante, que contribui para a redução do contato direto entre as superfícies de contato.

4.4.1.2 Análise de coeficiente de atrito dos lubrificantes vegetais de urucum

Para avaliar o desempenho tribológico do lubrificante vegetal de urucum, como o coeficiente de atrito, são apresentadas nas Figuras 34 e 35 as mudanças no coeficiente de atrito ao longo de todo o ensaio do par tribológico latão x aço, e do par tribológico aço x aço, proporcionando uma visualização precisa das interações entre as superfícies metálicas.

Figura 34: Variação do coeficiente de atrito com relação ao tempo de ensaio do par tribológico Latão x Aço.

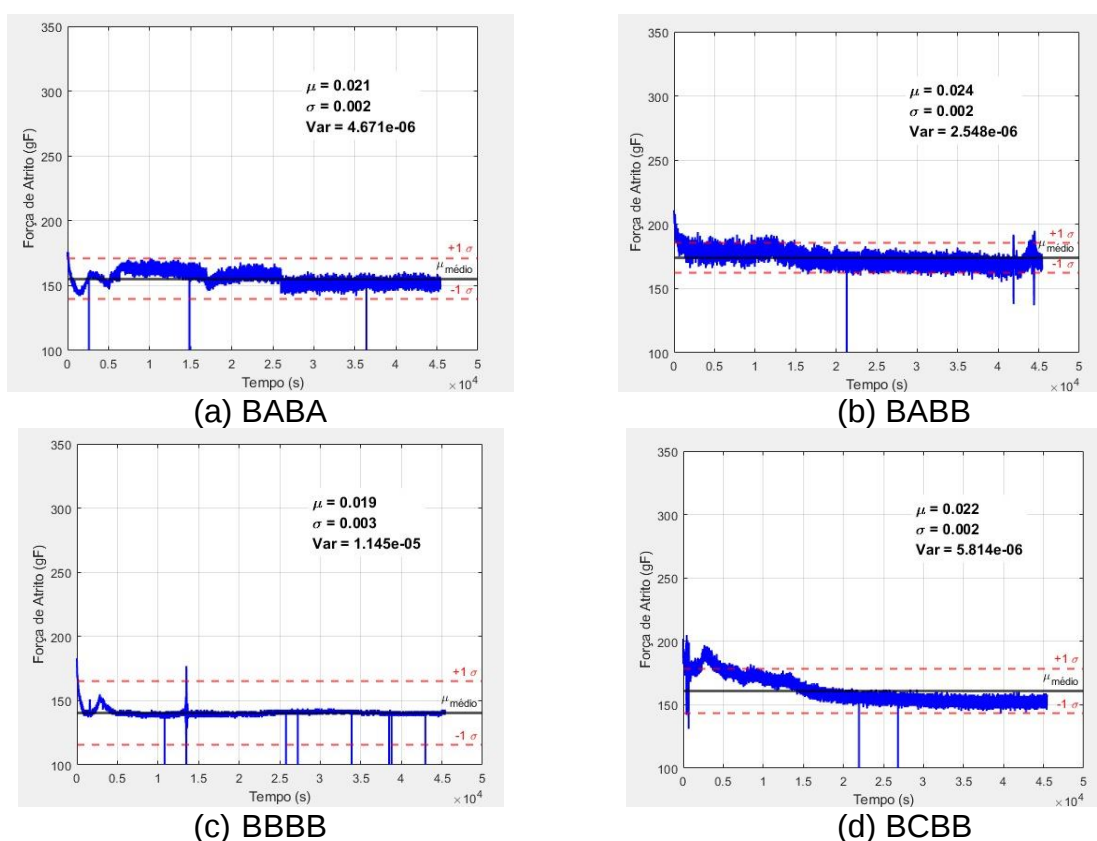


Fonte: Autoria própria (2025).

Conforme observado nos gráficos da Figura 34, o coeficiente de atrito apresenta uma variação significativa. No início dos ensaios, os valores são relativamente altos, seguidos por uma queda acentuada, o que pode indicar a movimentação ou remoção de contaminantes. Em seguida, ocorre uma fase de estabilização com pequenas flutuações, sugerindo uma interação controlada entre as superfícies e um desgaste suave. As oscilações do coeficiente de atrito, que variam entre 0,016 e 0,021, indicam a eficiência da lubrificação nas superfícies de contato.

Esse comportamento favorável na interação da lubrificação com o par tribológico resulta em um deslizamento leve e uniforme, atribuído à redução do coeficiente de atrito devido à menor adesão entre os materiais. Esse efeito pode estar relacionado à diminuição da dissipação de energia nos componentes mecânicos, evidenciando a influência de uma lubrificação adequada, conforme descrito por Stachowiak e Batchelor (2000) em seu estudo. Além dos desvios padrões e variância que demonstra boa reprodutividade com relação ao seu desenvolvimento dentro da faixa.

Figura 35: Variação do coeficiente de atrito com relação ao tempo de ensaio do par tribológico Aço x Aço.



Fonte: Autoria própria (2025).

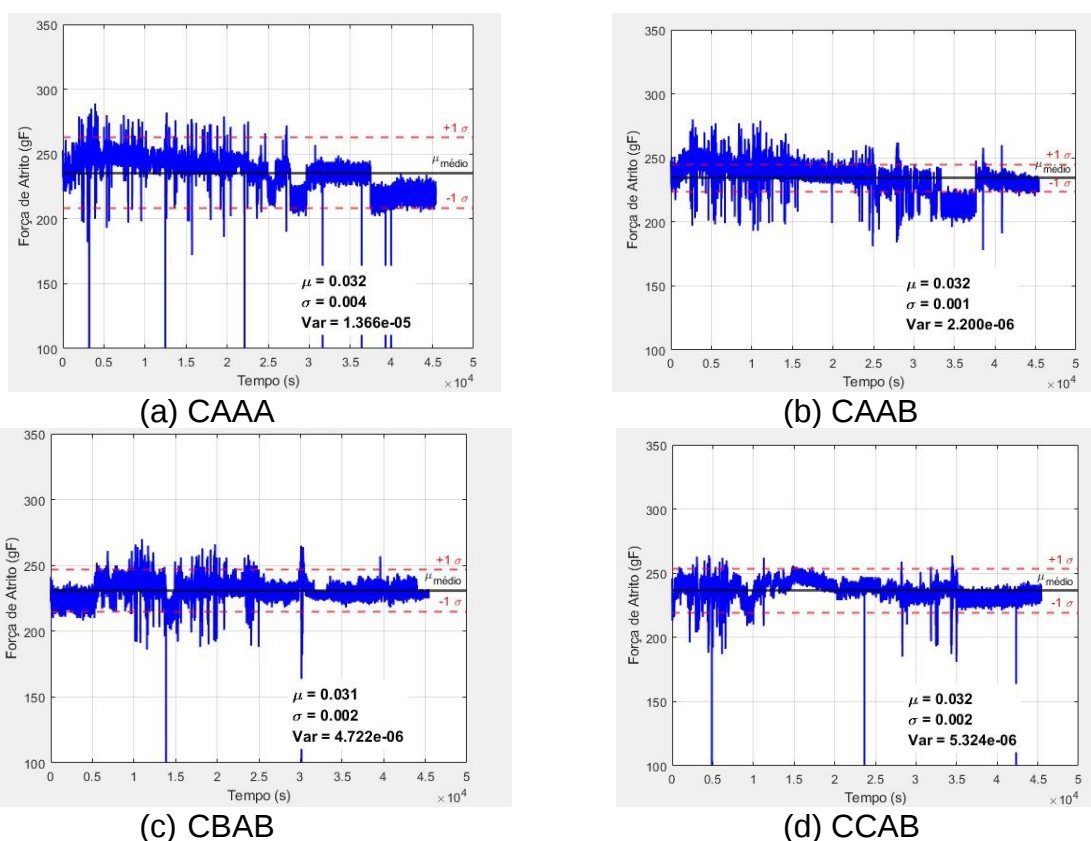
Observa-se nos ensaios da Figura 35 uma tendência inicial do comportamento do COF, caracterizada por oscilações acentuadas seguidas de estabilização, possivelmente associada a um período de formação da película lubrificante. Além disso, nos ensaios em que foram utilizados lubrificantes aditivados com nanopartículas de ZnO, ZnO/MoO₃ e ZnO+ZnO/MoO₃, nota-se que o COF se manteve relativamente menor em comparação ao lubrificante sem aditivos. Esses resultados sugerem que a adição de nanopartículas contribuiu de forma eficaz para a redução do

atrito e a melhoria da lubrificação. Com relação a faixa de desvio padrão, sendo evidenciada como limite de oscilação tolerável, indicado pelas curvas dentro da faixa apresentam uma lubrificação e deslizamento mais estáveis, enquanto os picos fora da faixa indicam atrito mais irregular.

4.4.1.3 Análise de coeficiente de atrito dos lubrificantes minerais PNM55

Nas Figuras 36 e 37 são apresentados os resultados obtidos dos ensaios de coeficiente de atrito dos lubrificantes minerais com a utilização dos pares tribológicos de latão x aço e aço x aço.

Figura 36: Variação do coeficiente de atrito com relação ao tempo de ensaio do par tribológico Latão x Aço.



Fonte: Autoria própria (2025).

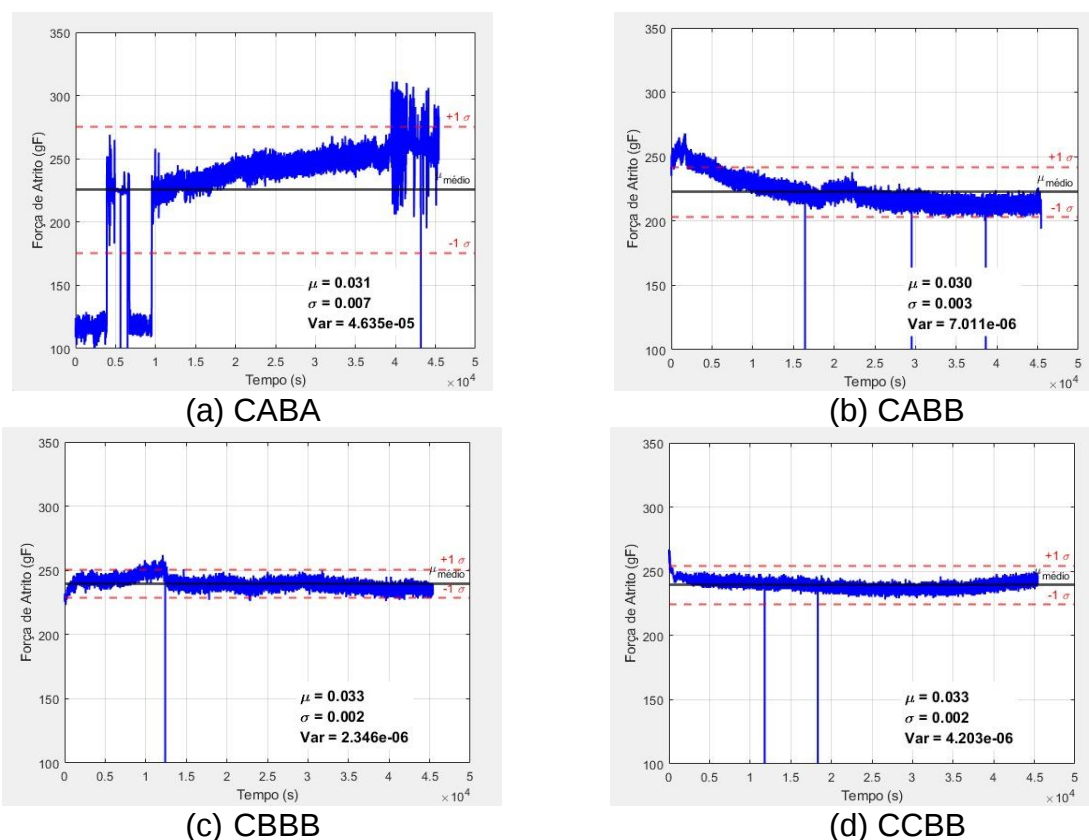
Os resultados obtidos indicam uma pequena variação no coeficiente de atrito entre as amostras ensaiadas com o par tribológico latão x aço, apresentando valores médios entre 0,031 e 0,032. Essa estabilidade sugere a formação de uma película

lubrificante eficiente, capaz de minimizar a interação direta entre as superfícies e reduzir o atrito.

No entanto, observa-se um comportamento inicial irregular, caracterizado por picos elevados seguidos por uma queda acentuada no coeficiente de atrito, o que pode estar associado ao desgaste inicial das superfícies em contato, o que se concretizam através dos desvios padrões e variâncias. Esse padrão pode estar relacionado à acomodação das superfícies e à remoção de contaminantes, indicando um regime de atrito misto antes da estabilização da película lubrificante.

De acordo com as afirmativas de Stachowiak e Batchelor (2000) e Pirro *et al.*, (2017), os lubrificantes ensaiados gerarão respostas significativamente positivas fornecendo uma barreira lubrificante, diminuindo tanto o contato direto entre os materiais e deste modo a diminuição da remoção de material. Além disso, a irregularidade observada na fase inicial dos ensaios pode estar associada à transição entre diferentes regimes de lubrificação, possivelmente influenciada pela umidade presente no ambiente.

Figura 37: Variação do coeficiente de atrito com relação ao tempo de ensaio do par tribológico Aço x Aço.



Fonte: Autoria própria (2025).

Observa-se, nos ensaios da Figura 37, oscilações no coeficiente de atrito ao longo de todo o tempo de ensaio, variando entre 0,030 e 0,033, seguidas por uma tendência de estabilização, além dos desvios padrões em torno de 0,002 a 0,007 sugere um desempenho instável nos períodos iniciais. Esse comportamento está diretamente relacionado à transição entre diferentes regimes de lubrificação, que pode ocasionar a remoção de contaminantes e irregularidades durante o período de ajuste das superfícies metálicas, resultando em picos momentâneos de atrito. Além disso, nos ensaios em que foram utilizados lubrificantes aditivados, a formação de uma película lubrificante pode ter contribuído para a redução da força de atrito média.

4.4.1.4 Análise comparativa de coeficiente de atrito dos lubrificantes ensaiados

Em geral, pode-se salientar que a variação entre os ensaios de deslizamento indica que as condições de operação, como a carga aplicada, a velocidade de deslizamento, o tipo de material, influenciam consideravelmente o comportamento tribológico. Essas diferenças devem ser consideradas ao analisar o desempenho dos materiais em aplicações práticas, uma vez que a interação entre os parâmetros pode afetar diretamente a eficiência da lubrificação, a estabilidade do coeficiente de atrito e a taxa de desgaste.

É possível pontuar que os ensaios dos lubrificantes vegetais quanto os lubrificantes minerais obtiveram resultados consideravelmente satisfatório. A umidade também pode ter influenciado diretamente na estabilidade da película lubrificante, resultando em oscilações no coeficiente de atrito. Os resultados obtidos situam-se abaixo dos coeficientes típicos tabelados para superfícies secas relatados por Young e Freedman (2008), que apontam como coeficientes de atrito cinético para o par tribológico latão x aço, o valor de 0,54 e para o par tribológico aço x aço de 0,57. Reforçando a importância da lubrificação.

4.4.2 Desgaste por variação de massa

Para quantificar a perda de massa nos corpos de prova durante os ensaios tribológicos, foram realizadas pesagens antes e depois do ensaio para verificação em uma balança de alta precisão, permitindo a determinação e identificação da perda de material durante o ensaio de *Pin-On-Disk*. Essa quantificação de perda de massa é

importante para avaliar o grau de desgaste sofrido pelos materiais testados. Os ensaios são apresentados em subseção de acordo com o tipo de lubrificante.

4.4.2.1 Análise de variação de perda de massa utilizando o lubrificante de mamona.

Na Tabela 12, são apresentadas as variações médias de perdas de massa dos pares tribológicos utilizados nos ensaios, com a incorporação das NPs de ZnO, ZnO/MoO₃ e ZnO+ZnO/MoO₃, indicando que o desgaste adquirido é devido ao atrito provocado na realização do ensaio entre as superfícies de contato.

Tabela 12: Variação da Massa dos Corpos de Prova Utilizando Lubrificante de Mamona.

Corpo de Prova/Aditivos	Perda de massa (%)
Aço	0,02
Latão	0,12
Aço – ZnO	0,02
Latão – ZnO	0,04
Aço - ZnO/MoO₃	0
Latão - ZnO/MoO₃	0,06
Aço - ZnO + ZnO/ MoO₃	0,02
Latão - ZnO + ZnO/ MoO₃	0,03

Fonte: Autoria própria (2025).

De acordo com os resultados na Tabela 12, nota-se uma possível degradação, do lubrificante durante o ensaio de atrito entre as superfícies ensaiadas, indicado pela diferença entre a massa inicial (antes do ensaio) e a massa final (após o ensaio). No caso da perda de massa medida do aço com lubrificante sem aditivos, essa perda foi mínima (0,02 %), sugerindo desgaste leve do par tribológico durante o ensaio. Para o latão, podemos observar que houve uma perda maior de massa (0,12 %).

Nos demais ensaios nota – se uma melhora em seus resultados, que está associada ao efeito esperado dos aditivos presentes nos lubrificantes, em decorrência a incorporação de ZnO, ZnO/MoO₃ e a mistura de ZnO + ZnO/MoO₃.

Esses efeitos nos resultados, podem ser vistos pelos percentuais obtidos em cada ensaio, no qual a média máxima de perda de massa foi de 0,06, demonstrando a eficácia da utilização de biolubrificantes para a melhora na redução do desgaste e a melhora da capacidade de lubrificação.

4.4.2.2 Análise de variação de perda de massa utilizando o lubrificante de urucum.

Na Tabela 13, podem ser observadas as variações médias de perdas de massa dos pares tribológicos em porcentagem, e a perda de massa com a incorporação de NPs de ZnO, ZnO/MoO₃ e ZnO+ZnO/MoO₃.

Tabela 13: Variação da Massa dos Corpos de Prova Utilizando lubrificante de Urucum.

Corpo de Prova/Aditivos	Perda de massa (%)
Aço	0,15
Latão	0,23
Aço – ZnO	0,17
Latão – ZnO	0,19
Aço - ZnO/MoO₃	0,15
Latão - ZnO/MoO₃	0,19
Aço - ZnO + ZnO/ MoO₃	0,02
Latão - ZnO + ZnO/ MoO₃	0,11

Fonte: Autoria própria (2025).

Observa-se na Tabela 14 variações na perda de massa para os ensaios com o lubrificante de urucum e os pares tribológicos, para os ensaios com aditivação de nanopartículas e os que não houve aditivação. Nota-se que a maior perda de massa ocorreu no latão, atingindo aproximadamente 0,23%.

A adição da combinação de aditivos ZnO + ZnO/MoO₃ apresentou um efeito benéfico na redução do desgaste do aço. Para o latão, todos os aditivos utilizados contribuíram para a diminuição do desgaste.

4.4.2.3 Análise de variação de perda de massa utilizando o lubrificante PNM55.

A Tabela 14, apresenta as variações de perda de massa dos pares tribológicos com a incorporação de NPs de ZnO, ZnO/MoO₃ e ZnO+ZnO/MoO₃.

Tabela 14: Variação da Massa dos Corpos de Prova Utilizando lubrificante PNM55.

Corpo de Prova/Aditivos	Perda de massa (%)
Aço	0,25
Latão	0,23
Aço – ZnO	0,11
Latão – ZnO	0,15
Aço - ZnO/MoO₃	0,13
Latão - ZnO/MoO₃	0,14
Aço - ZnO + ZnO/ MoO₃	0,01
Latão - ZnO + ZnO/ MoO₃	0,07

Fonte: Autoria própria (2025).

Os dados obtidos de variação de perda de massa do lubrificante PNM55 indicam sua limitação na resistência ao atrito em ambas as superfícies nos ensaios sem aditivos, apresentando desgaste superior a 0,20% tanto para o aço quanto para o latão. Nos ensaios com todos os nanoaditivos, observa-se uma redução significativa do desgaste, especialmente no aço, evidenciando a melhoria na resistência ao desgaste.

Além disso, a utilização combinada das NPs de ZnO e ZnO/MoO₃ demonstrou grande eficiência, indicando que a sinergia entre os aditivos potencializa a capacidade do lubrificante PNM55 de reduzir o desgaste. Essa interação favorece a lubrificação e torna o lubrificante mais eficaz na minimização do atrito entre as superfícies de aço e latão.

4.4.2.4 Análise comparativa dos ensaios de perda de massa dos pares tribológicos

Em geral, observa-se que as condições de operação, como a carga aplicada, a velocidade de deslizamento, a dureza dos materiais e a presença de aditivos, influenciam significativamente o desempenho tribológico dos materiais ensaiados, independentemente do lubrificante utilizado. Outro aspecto relevante a ser destacado é a eficácia da incorporação das nanopartículas de ZnO, ZnO/MoO₃ e ZnO+ZnO/MoO₃ na redução do atrito e do desgaste. Os resultados indicam a formação de uma camada lubrificante protetora, corroborando as afirmações de Stachowiak e Batchelor (2000), Maru (2003) e Silva, (2023), que ressaltam a influência dos nanoaditivos na melhoria do desempenho tribológico ao longo dos ensaios.

De modo geral, os resultados evidenciam que os lubrificantes vegetais à base de mamona e urucum, bem como o lubrificante mineral PNM55, apresentam respostas positivas e distintas. Nota-se que os lubrificantes vegetais demonstram desempenho competitivo na proteção contra desgaste e atrito em comparação ao lubrificante mineral, especialmente quando aditivados com nanopartículas. Além disso, a incorporação dessas nanopartículas melhora a lubrificação e contribui para o aumento da vida útil dos componentes mecânicos. Nesse contexto, os resultados obtidos sugerem que a combinação de nanoaditivos aos lubrificantes vegetais e minerais representa uma alternativa promissora para a melhoria do desempenho tribológico em aplicações industriais.

4.5 ANÁLISE DAS PARTÍCULAS DE DESGASTE – PÓS ENSAIO TRIBOLÓGICO

Após os ensaios tribológicos, a análise das partículas de desgaste é fundamental e requer o uso de técnicas avançadas que permitem uma avaliação tanto quantitativa quanto qualitativa dessas partículas. Entre as técnicas empregadas, destacam-se a espectrometria de raios X, que fornece informações sobre a composição química das partículas, e o índice de PQ, que quantifica a presença de partículas ferromagnéticas no lubrificante.

4.5.1 Espectrometria de raio X

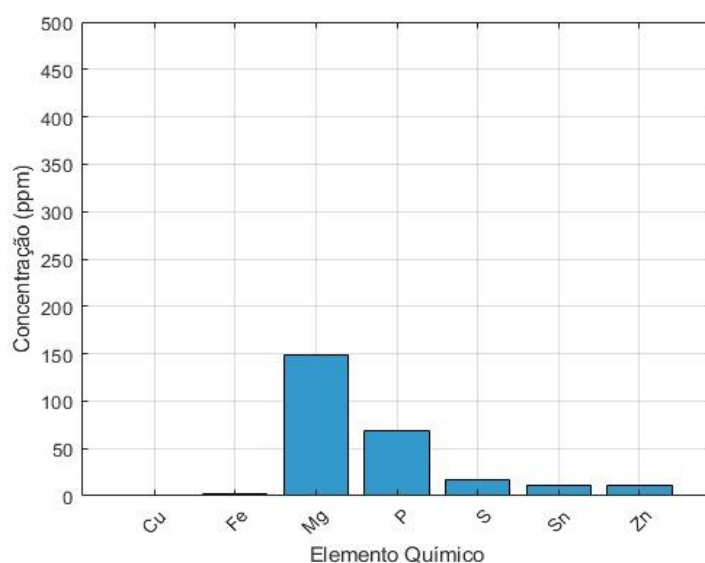
A espectrometria de raios X foi realizada nas amostras dos três lubrificantes estudados para determinar com precisão sua composição química. O equipamento

utilizado permite a análise de até 18 elementos químicos, porém, neste estudo, o foco foi nos elementos de maior interesse: magnésio, fósforo, enxofre, ferro, cobre, zinco e estanho, cujas concentrações foram medidas em ppm (partes por milhão). Os resultados são apresentados em subseções.

4.5.1.1 Análise elementar dos lubrificantes de mamona por espectrometria de raio X.

Na Figura 38, é apresentado resultados do ensaio de DRX do lubrificante de mamona puro. Nas Figuras 39 e 40 são apresentados gráficos de resultados de quantificações numéricas das amostras dos lubrificantes vegetais de mamona submetidos a outros ensaios. Os elementos químicos são exibidos em colunas para cada ensaio realizado, com os resultados organizados de acordo com o par tribológico utilizado. Essa abordagem facilita a comparação do comportamento de cada lubrificante em relação aos elementos avaliados.

Figura 38: Quantificação de partículas presente no lubrificante de mamona puro.



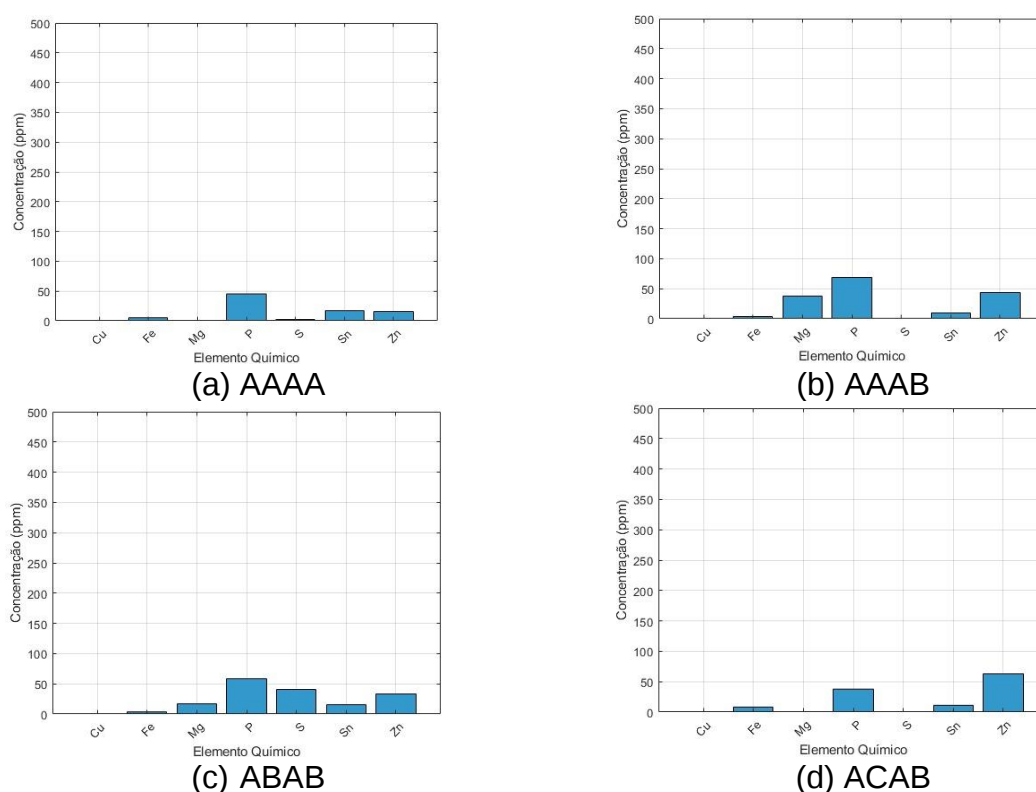
Fonte: Autoria própria (2025).

Observa-se na Figura 38 a presença de diferentes elementos químicos no lubrificante de mamona puro, com destaque para a predominância de magnésio (Mg) e a alta concentração de fósforo (P). Essas concentrações elevadas podem estar associadas à contaminação durante o processo de extração.

Além disso, também são identificados outros elementos, como enxofre (S), ferro (Fe), estanho (Sn) e zinco (Zn). A presença desses elementos pode estar

associada a traços naturais da matéria-prima, ao contato com equipamentos durante o processamento e armazenamento, bem como à sua origem geográfica (Silva, 2023). Na Figura 39, é apresentado os resultados dos ensaios dos lubrificantes vegetais de mamona utilizando pares tribológicos latão e aço.

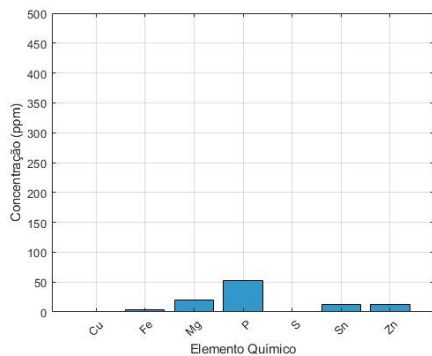
Figura 39: Quantificação de partículas presente no lubrificante de mamona com par tribológico Latão x Aço.



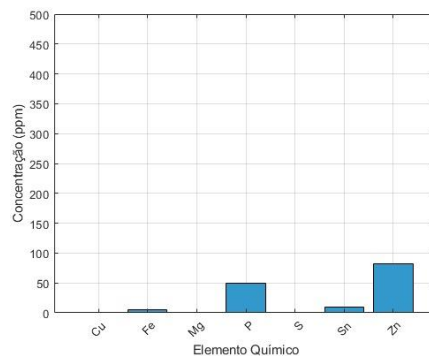
Fonte: Autoria própria (2025).

Nota-se nos resultados, a variação dos elementos presentes como o Fe nos ensaios com a adição de nanopartículas de ZnO, ZnO/MoO₃ e ZnO+ZnO/MoO₃. Essas variações estão relacionadas à redução do atrito e ao aumento da resistência ao desgaste, atribuídos principalmente ao ZnO, conhecido por suas propriedades anti-desgaste e antioxidantes (Taha-Tijerina *et al.*, 2018). Ademais, observa-se que o aumento do teor de zinco pode estar relacionado à adição do óxido desse elemento. Na Figura 40 são apresentados os resultados obtidos utilizando par tribológico aço x aço.

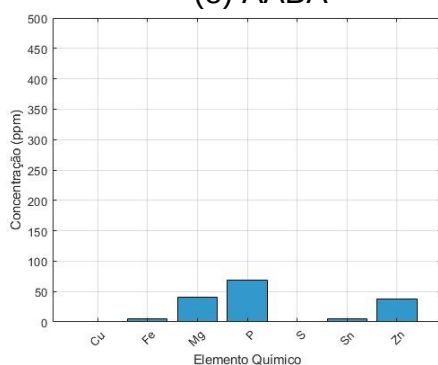
Figura 40: Quantificação de partículas presente no lubrificante de mamona com par tribológico Aço x Aço.



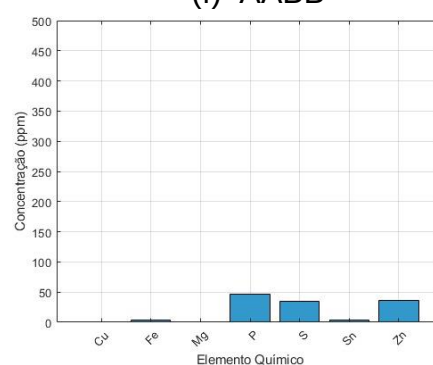
(e) AABA



(f) AAB B



(g) ABB B



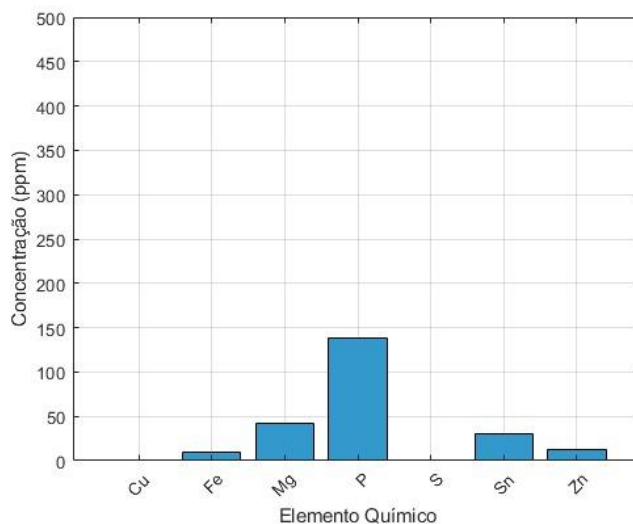
(h) ACBB

Fonte: Autoria própria (2025).

Os gráficos dos elementos químicos mostram uma variação notável nas concentrações dos componentes presentes nos diferentes ensaios com o lubrificante de mamona, sob diversas condições. Elementos como magnésio e fósforo aparecem em concentrações elevadas, sugerindo propriedades vantajosas, como proteção contra desgaste e corrosão.

4.5.1.2 Análise elementar dos lubrificantes de urucum por espectrometria de raios X.

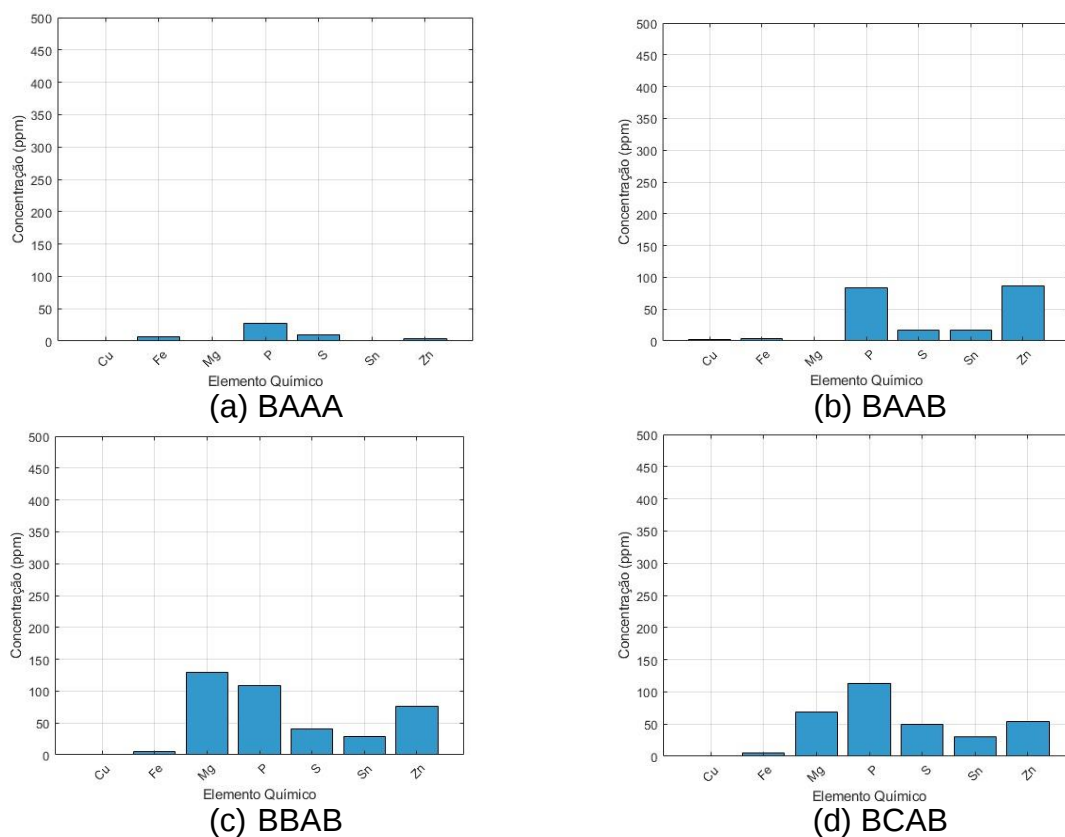
Figura 41: Quantificação de partículas presente no lubrificante de urucum puro.



Fonte: Autoria própria (2025).

Observando os resultados dos elementos químicos presente no ensaio BAAA puro, nota-se predominância de Mg e alta concentração de P, sugerindo a capacidade de proteção contra desgaste e corrosão (Karak, 2012). Na Figura 42 é apresentado os ensaios realizados com par tribológico latão x aço.

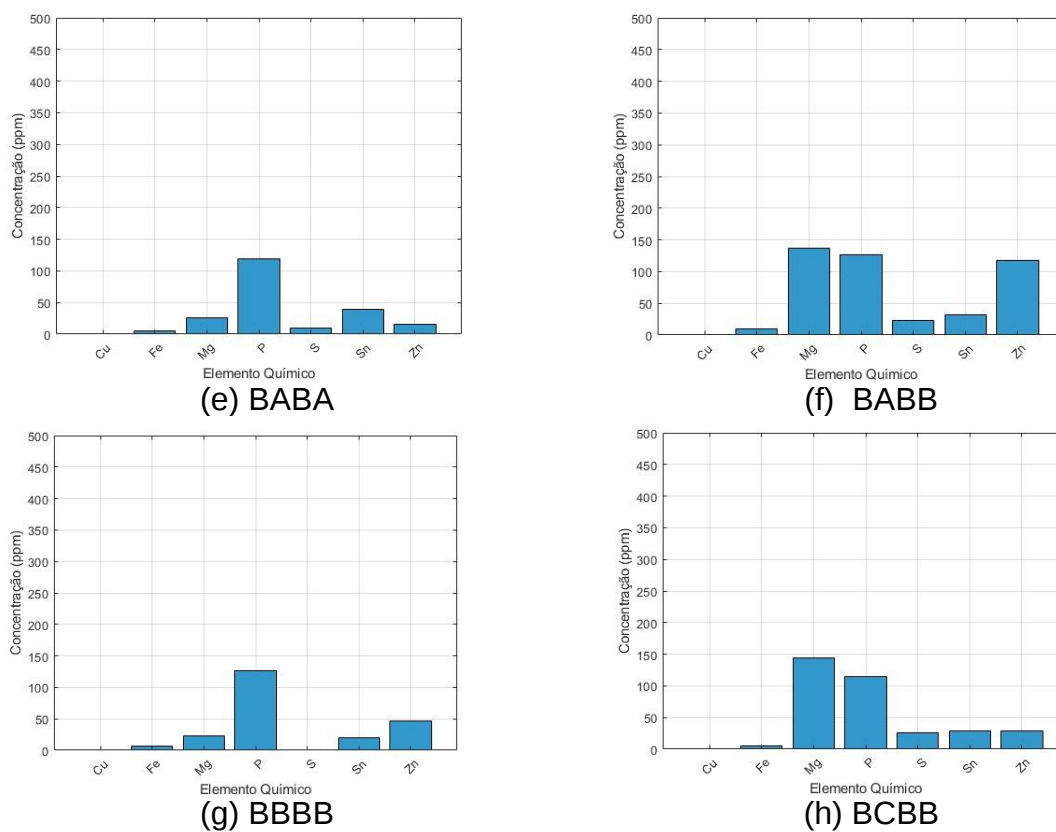
Figura 42: Quantificação de partículas presente no lubrificante de urucum com par tribológico Latão x Aço.



Fonte: Autoria própria (2025).

A análise dos ensaios realizados com os lubrificantes de urucum revelou variações significativas na composição química das amostras, refletindo diferenças nas propriedades tribológicas e antioxidantes. Observou-se ainda que o aumento do teor de zinco pode estar associado à adição do óxido desse metal. Na Figura 43, são apresentados os resultados obtidos dos ensaios de DRX, utilizando par tribológico aço x aço.

Figura 43: Quantificação de partículas presente no lubrificante de urucum com par tribológico aço x aço



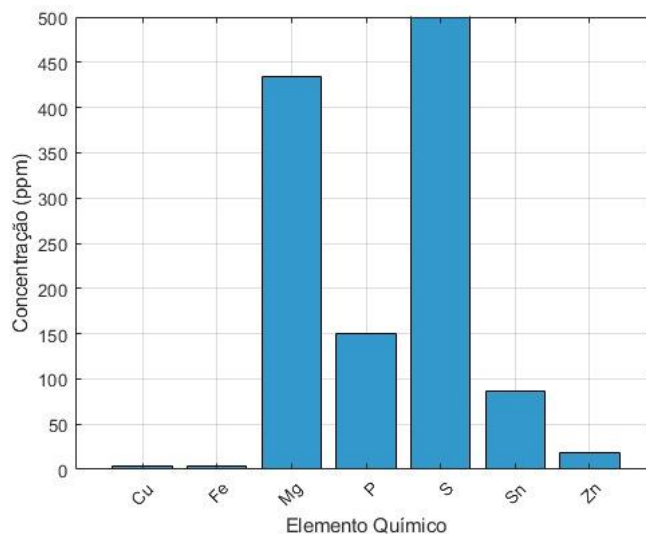
Fonte: Autoria própria (2025).

Observa – se nos resultados BBBB e BCBB a redução de Zn, podendo ser atribuída a interação de aditivos a elemento de ligas presentes no metal.

4.5.1.3 Análise elementar dos lubrificantes de PNM55 por espectrometria de raios X

Nas Figuras 44, 45 e 46 são apresentadas análises elementares dos lubrificantes PNM55.

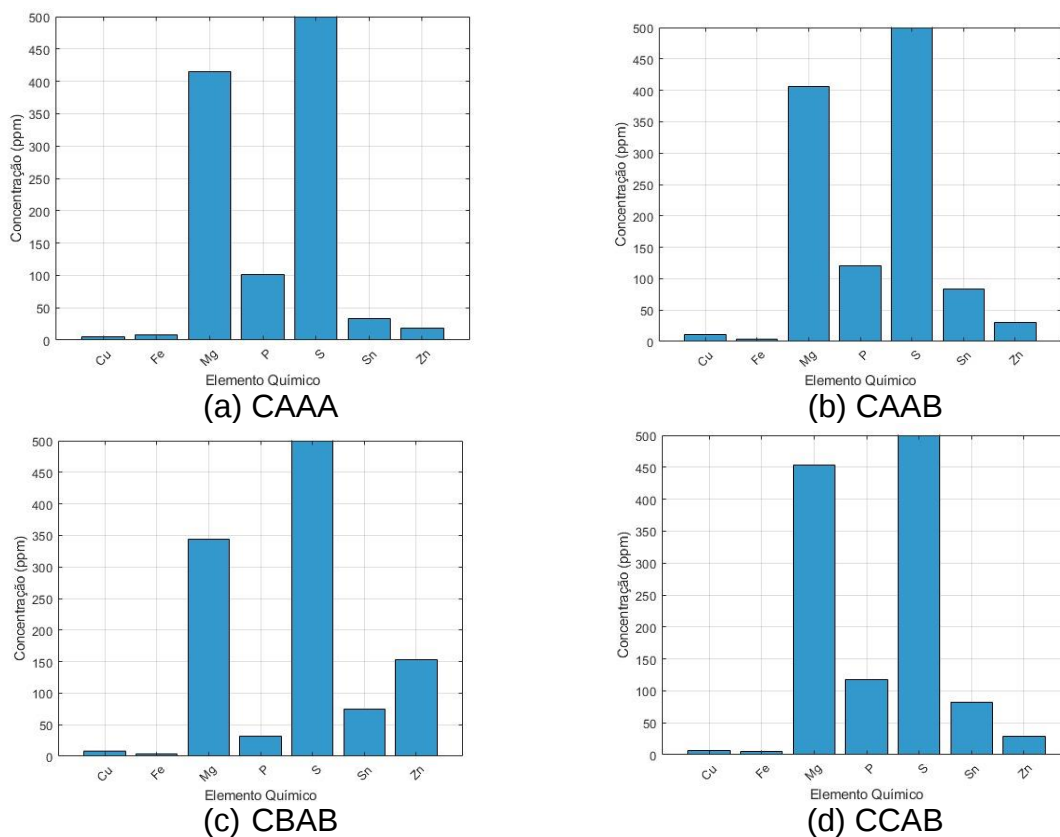
Figura 44: Quantificação de partículas presente no lubrificante de PNM55 puro.



Fonte: Autoria própria (2025).

Na Figura 44, observa-se a composição química do lubrificante CAAA puro, sugerindo propriedades como boa proteção contra desgaste e extrema pressão, devido à alta concentração de S e P. A presença de Mg pode contribuir para a estabilidade química, enquanto os teores reduzidos de Fe e Cu indicam baixa corrosão e desgaste inicial (Zhao *et al.*, 2021).

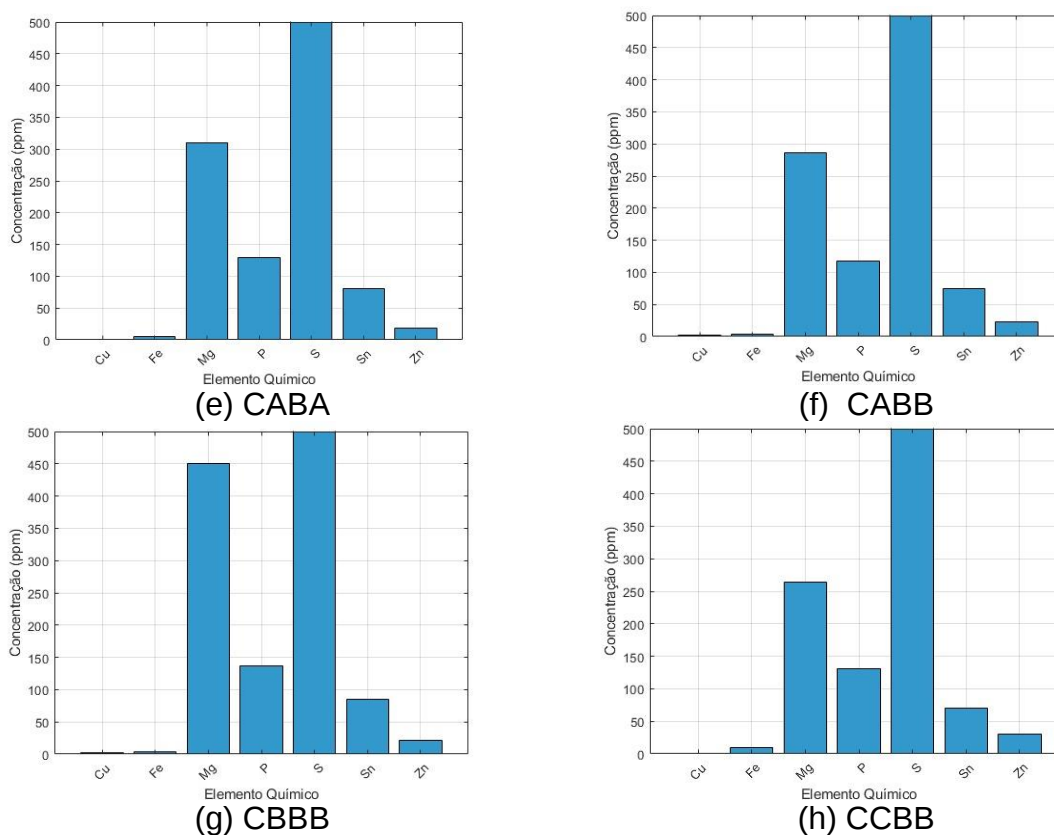
Figura 45: Quantificação de partículas presente no lubrificante de PNM55 com par tribológico Latão x Aço.



Fonte: Autoria própria (2025).

Nota-se na Figura 45, uma tendência observada nos ensaios é a predominância de enxofre (S), com uma concentração acima de 500 ppm em todas as amostras. Embora essa quantidade contribua para a formação de uma camada superficial espessa, seu impacto ambiental deve ser considerado em estudos futuros devido à alta concentração. Além disso, a ausência de Cu e Fe em todos os ensaios sugere resultados positivos em relação ao desgaste e à oxidação. Na Figura 46, é observada os efeitos do lubrificante com par tribológico aço x aço.

Figura 46: Quantificação de partículas presente no lubrificante de PNM55 com par tribológico Aço x Aço.



Fonte: Autoria própria (2025).

A partir dos resultados obtidos, observa-se variações inferiores a 100 ppm do elemento Zn, o que não permite uma conclusão clara sobre a redução do atrito com a adição do aditivo.

4.5.1.3.1 Análise comparativa da quantidade de partículas por raio X

De modo geral, as diferenças observadas nos ensaios demonstram que a incorporação das nanopartículas nos lubrificantes influenciou significativamente suas propriedades químicas e físicas, resultando em melhorias na lubrificação e no desempenho tribológico, especialmente quando ambas as NPs foram adicionadas.

4.5.2 Índice de PQ

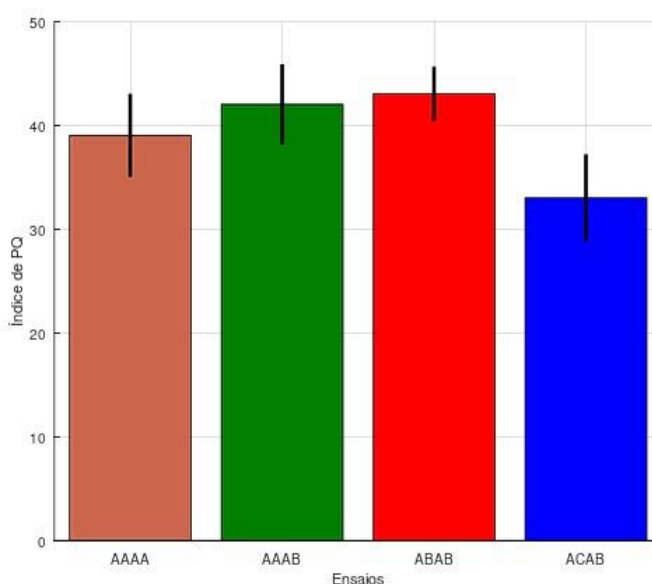
Para identificar a presença de partículas de desgaste nos lubrificantes, utilizou-se a análise do índice de PQ (PQI). Os resultados foram organizados em subseções

de acordo com os lubrificantes, seguidos por uma apresentação comparativa dos ensaios.

4.5.2.1 Índice de PQ dos lubrificantes vegetais de mamona

A Figura 47 e 48, são apresentados os gráficos dos ensaios do lubrificante vegetal de mamona, permitindo a comparação das possíveis alterações decorrentes da utilização de pares tribológicos distintos e da adição de nanopartículas.

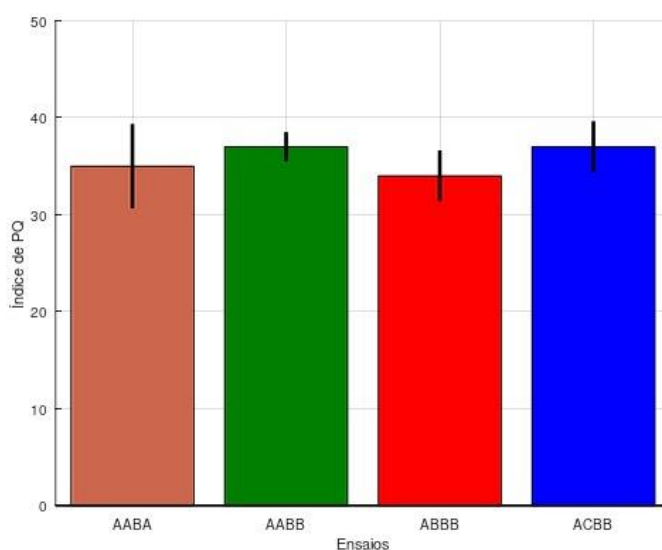
Figura 47: Índice de PQ dos ensaios com os lubrificantes de mamona com par tribológico Latão x Aço.



Fonte: Autoria própria (2025).

Pela Figura 47 observamos que para o óleo de mamona a adição dos aditivos combinados reduziu um pouco o desgaste no par Latão x Aço, representando pelo menor teor de partículas magnéticas (menor índice de PQ). As adições dos aditivos em separados praticamente não surtiu efeito no desgaste para este par.

Figura 48: Índice de PQ dos ensaios com os lubrificantes de mamona com par tribológico Aço x Aço.



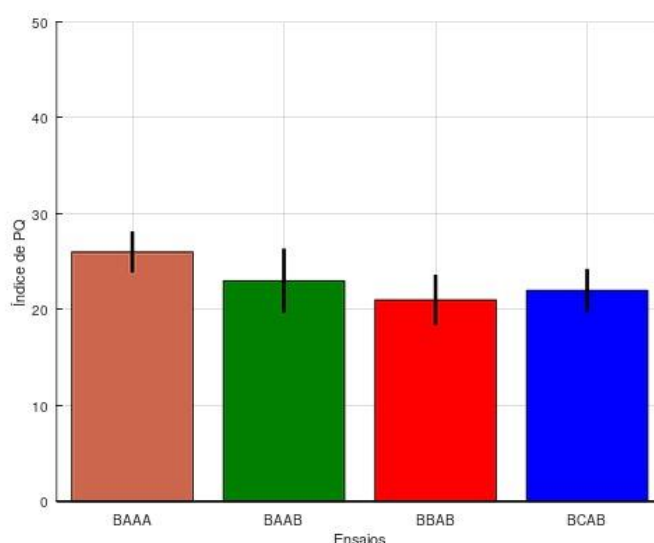
Fonte: Autoria própria (2025).

Pela figura observamos que praticamente não houve variação no desgaste do par Aço x Aço com a introdução de aditivos ao óleo de mamona.

4.5.2.2 Índice de PQ dos lubrificantes vegetais de urucum

Na Figura 49 e 50, são apresentados os resultados obtidos nos ensaios do lubrificante vegetal de urucum, permitindo a verificação das possíveis alterações no PQI dos lubrificantes.

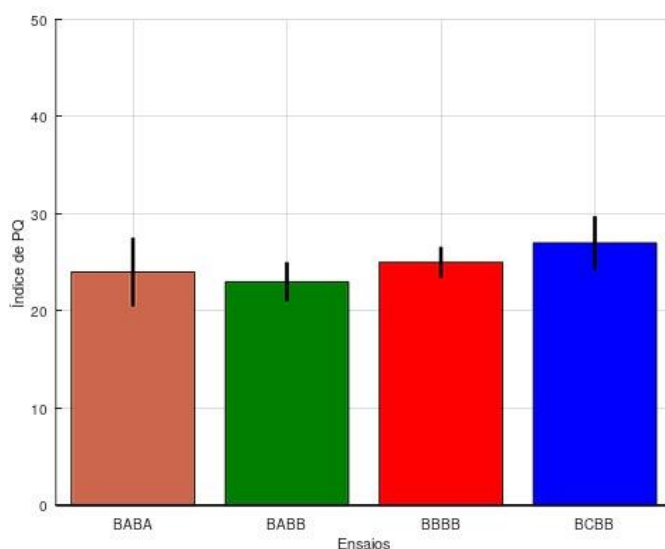
Figura 49: Índice de PQ dos ensaios com os lubrificantes de urucum com par tribológico Latão x Aço.



Fonte: Autoria própria (2025).

Observa-se na Figura 49 que a adição de nanopartículas, especialmente no ensaio BBAB (ZnO/MoO_3), melhora o desempenho tribológico, seguida pelos ensaios BCAB ($\text{ZnO} + \text{ZnO}/\text{MoO}_3$) e BAAB (ZnO), que também apresentam menores índices de PQ.

Figura 50: Índice de PQ dos ensaios com os lubrificantes de urucum com par tribológico Aço x Aço.



Fonte: Autoria própria (2025).

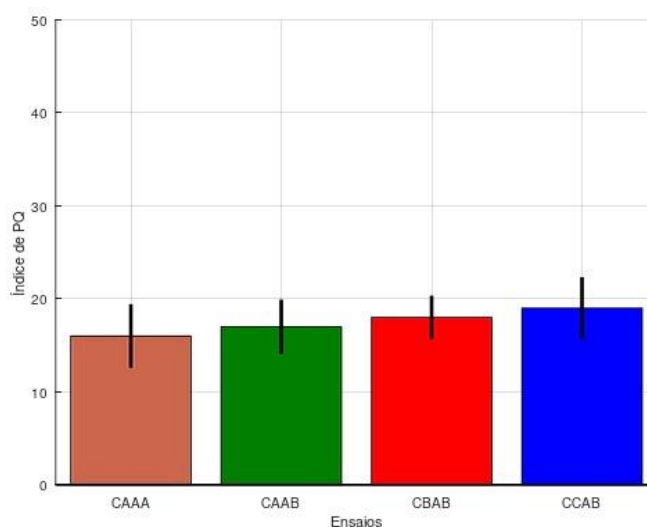
Pela Figura observamos que praticamente não houve variação no desgaste do par Aço x Aço com a introdução dos aditivos ao óleo de urucum.

4.5.2.3 Índice de PQ dos lubrificantes minerais de PNM55.

Na Figura 51, são apresentados os resultados obtidos nos ensaios do lubrificante mineral PNM55, permitindo a verificação das possíveis alterações dos PQI.

Figura 51: Índice de PQ dos ensaios com os lubrificantes mineral PNM55 com par

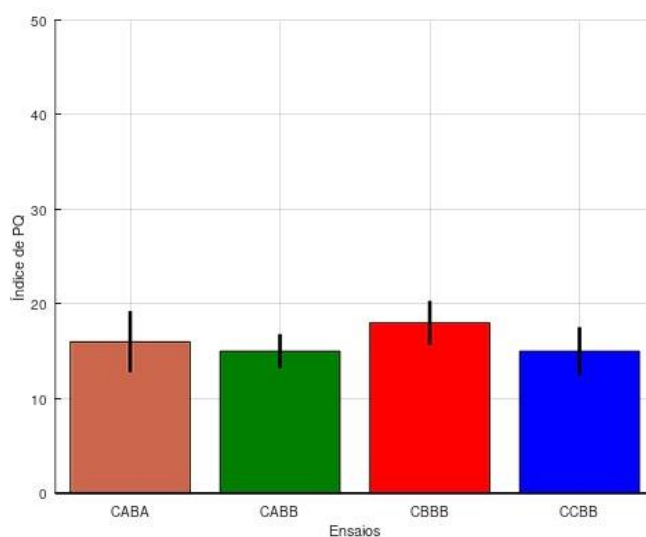
tribológico Latão x Aço.



Fonte: Autoria própria (2025).

Pela Figura 51 observamos que praticamente não houve variação no desgaste do par Latão x Aço com a introdução dos aditivos ao óleo mineral.

Figura 52: Índice de PQ dos ensaios com os lubrificantes mineral PNM55 com par tribológico Aço x Aço.



Fonte: Autoria própria (2025).

Pela Figura 52 observamos que praticamente não houve variação no desgaste do par Aço x Aço com a introdução dos aditivos ao óleo mineral.

4.5.2.4 Análise comparativa dos índices de PQ.

Pelas análises do índice de partículas magnéticas não podemos concluir que um aditivo é melhor que o outro para a diminuição do desgaste. Pela utilização do equipamento de medição de partículas magnéticas para se afirmar que um determinado par sofreu maior desgaste que o outro a variação nesta contagem deve ser maior que 20.

4.5.3 Ferrografia analítica

Com o objetivo de analisar as partículas de desgaste, os resultados foram organizados em três subseções: análise de ferrografia analítica dos lubrificantes vegetais de mamona, análise de ferrografia analítica dos lubrificantes vegetais de urucum e análise de ferrografia analítica do lubrificante mineral PNM55. As membranas utilizadas nesse ensaio possuíam poros de 1 μm . Para os fins deste trabalho, adotaremos a determinação dos tamanhos das partículas conforme apresentado na Tabela 15.

Tabela 15: Determinação de tamanhos de partículas.

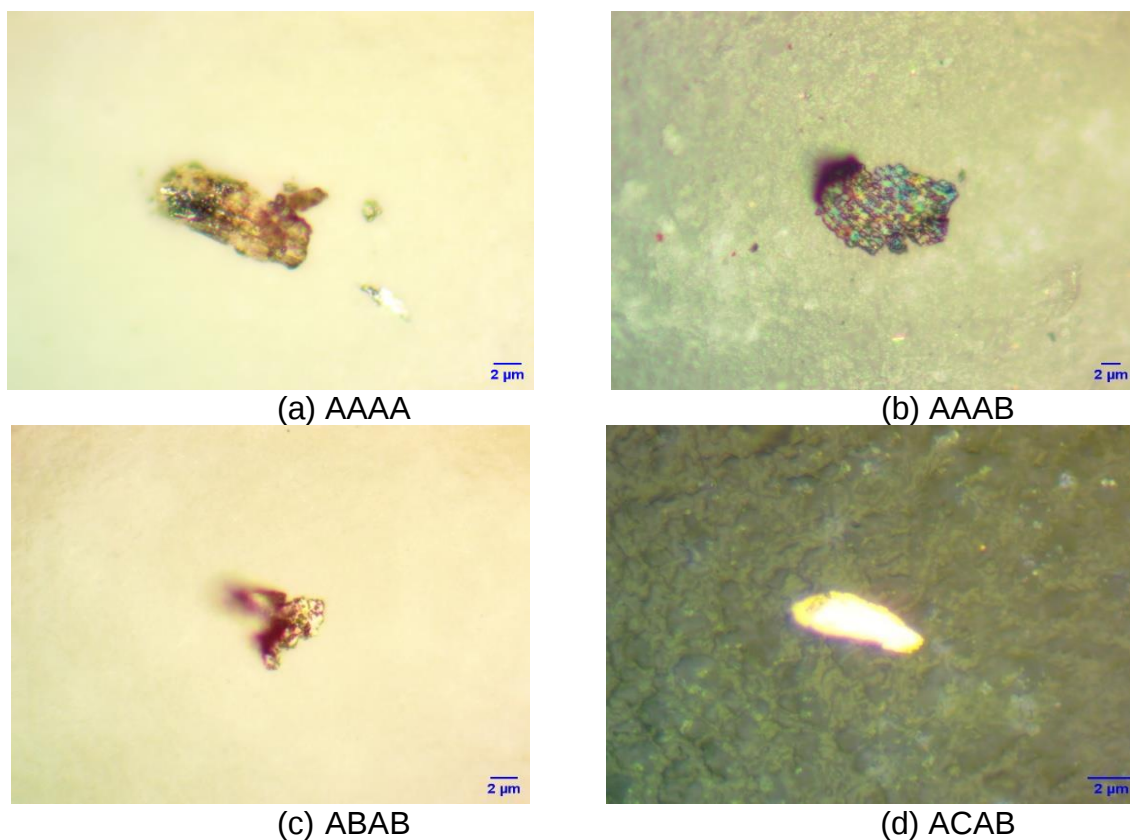
Determinação	Tamanhos (μm)
Pequenas	< 150
Médias	150 – 250
Grandes	> 250

Fonte: Autoria Própria (2025).

4.5.3.1 Análise de ferrografia analítica do lubrificante vegetal de mamona

Para a análise de ferrografia analítica das partículas de desgaste, foram realizados oito ensaios para o lubrificante, sendo quatro ensaios correspondentes ao par tribológico: latão x aço e aço x aço. Os resultados obtidos estão apresentados nas Figuras 53 e 54 e foram essenciais para avaliar a influência da adição das nanopartículas (NPs) de ZnO, ZnO/MoO₃ e da mistura ZnO + ZnO/MoO₃ aos lubrificantes testados. Ressalta-se que, devido ao latão não ser ferromagnético, foi necessária a realização do ensaio por membrana para a coleta das partículas de desgaste.

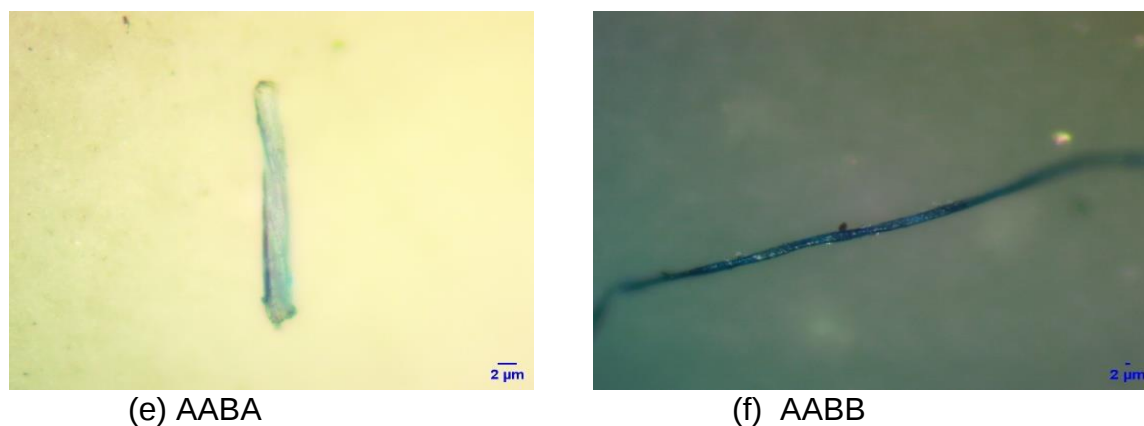
Figura 53: Ferrografia analítica das amostras de par tribológico Latão x Aço.

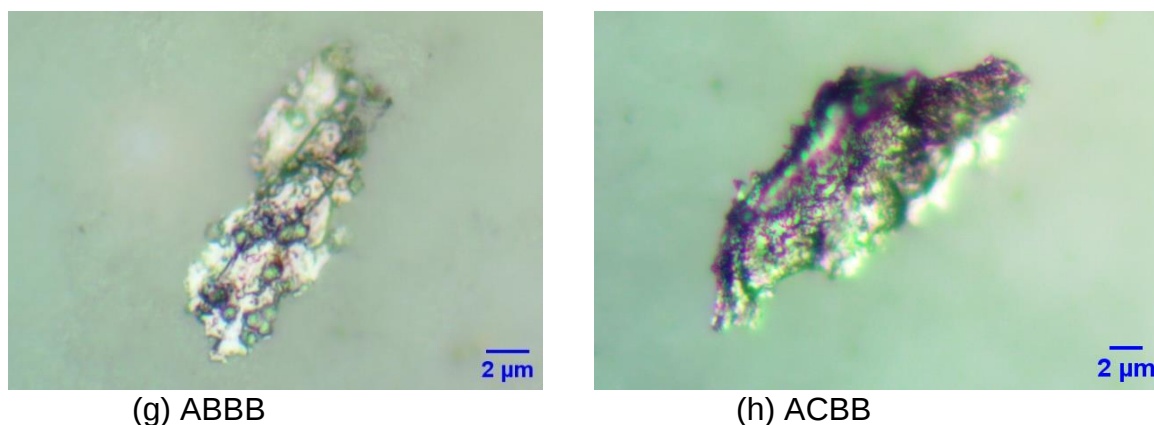


Fonte: Autoria própria (2025).

Pelas imagens presentes na Figura 53, notam-se partículas com tamanho médio de 10 microns, caracterizando um desgaste brando. São partículas metálicas devido a sua opacidade e, pela coloração amarelada de algumas destas, presume-se que sejam oriundas da parte Latão do par em desgaste.

Figura 54: Ferrografia analítica das amostras de par tribológico Aço x Aço.





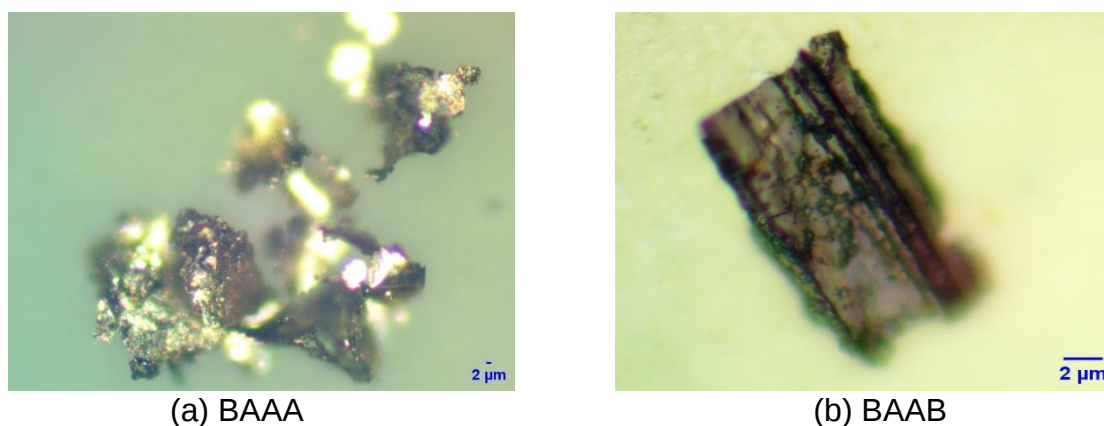
Fonte: Autoria própria (2025).

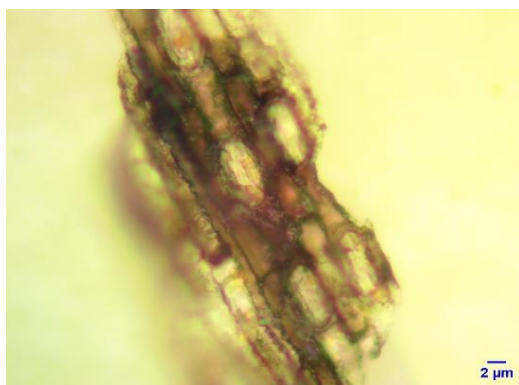
Pelas imagens presentes na Figura 54 observam-se partículas com tamanho médio de 10 microns. São partículas metálicas devido a sua opacidade.

4.5.3.2 Análise de ferrografia analítica dos lubrificantes vegetais de urucum

Nas Figuras 55 e 56, são apresentados os resultados obtidos a partir das morfologias de partículas de desgaste dos ensaios. Devido o latão não possuir partículas ferromagnéticas foi realizado o ensaio de membrana para o par tribológico latão x aço.

Figura 55: Ferrografia analítica das amostras de par tribológico Latão x Aço.





(c) BBAB

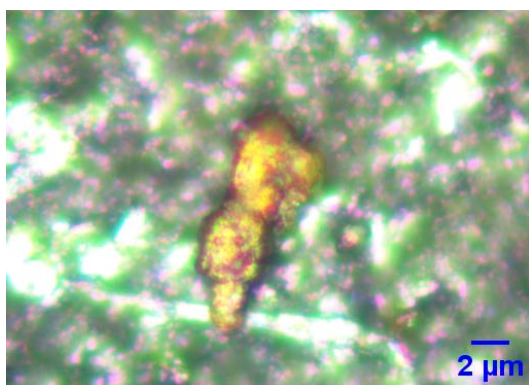


(d) BCAB

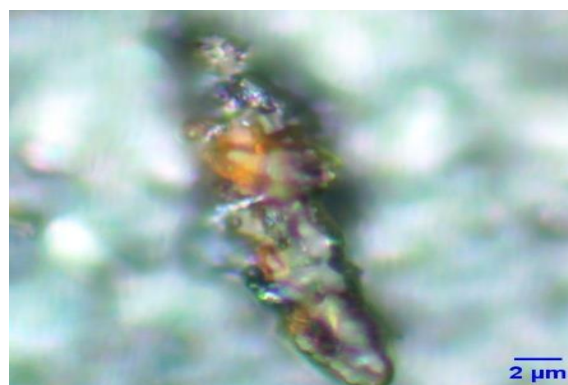
Fonte: Autoria própria (2025).

Pelas imagens presentes na Figura 55 observam-se partículas com algumas estrias, indicando um desgaste um pouco mais severo que os anteriores.

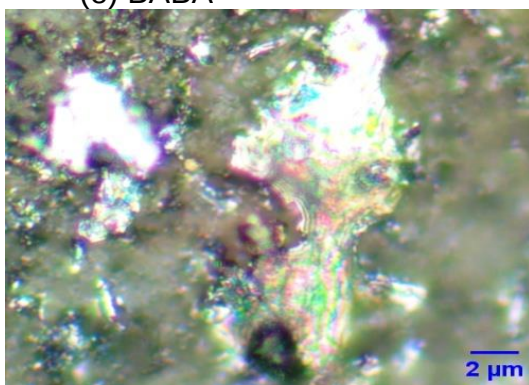
Figura 56: Ferrografia analítica das amostras de par tribológico Aço x Aço.



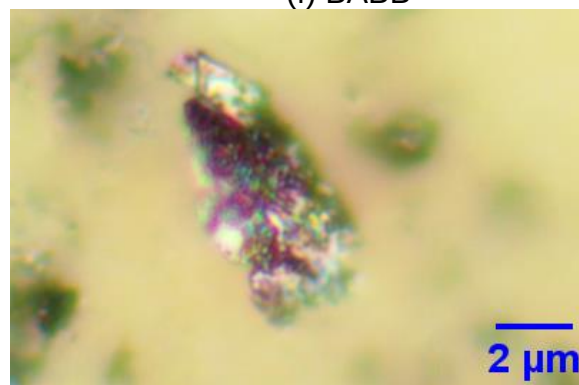
(e) BABA



(f) BABB



(g) BBBB



(h) BCBB

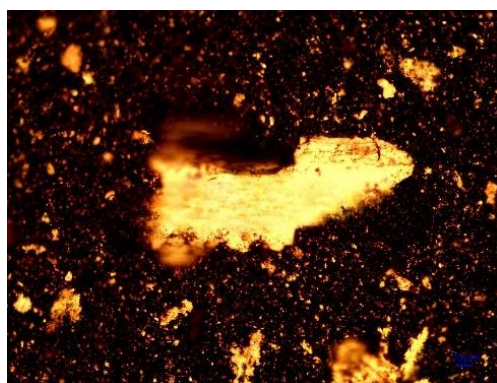
Fonte: Autoria Própria (2025).

Pelas imagens presentes na Figura 56 observam-se partículas com algumas estrias, indicando um desgaste um pouco mais severo que as anteriores.

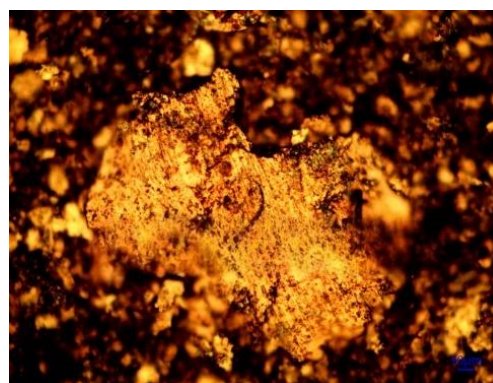
4.5.3.3 Análise de ferrografia analítica dos lubrificantes minerais PNM55

Nas Figuras 57 e 58, estão apresentados os resultados das partículas de desgaste obtidas utilizando o par tribológico latão x aço e aço x aço. Devido os ensaios de latão não serem ferromagnéticas, foi utilizado o ensaio de membrana.

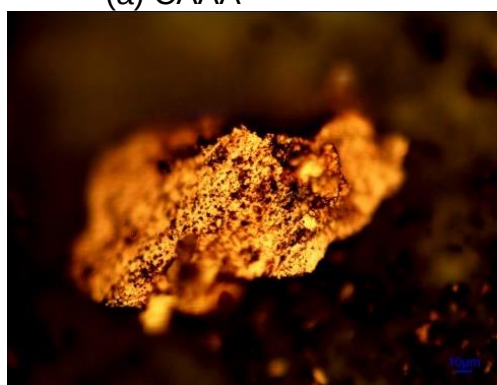
Figura 57: Ferrografia analítica das amostras de par tribológico Latão x Aço.



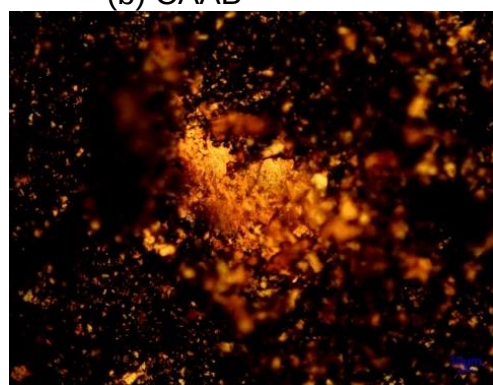
(a) CAAA



(b) CAAB



(c) CBAB

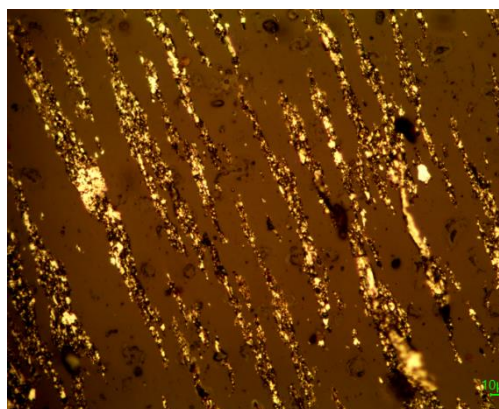


(d) CCAB

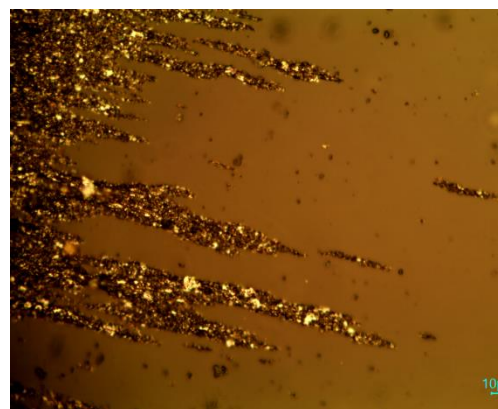
Fonte: Autoria própria (2025).

Pelas imagens presentes na Figura 57 observam-se partículas opacas e com coloração amarelada, indicando desgaste do latão.

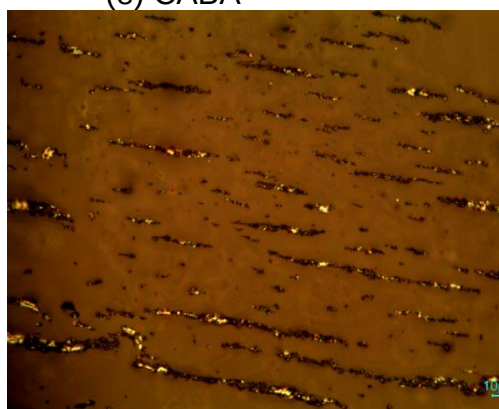
Figura 58: Ferrografia analítica das amostras de par tribológico Aço x Aço.



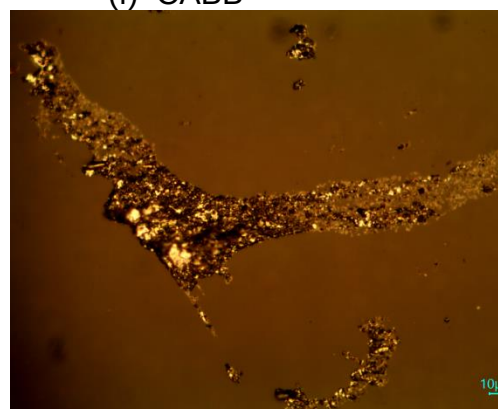
(e) CABA



(f) CABB



(g) CBBB



(h) CCBB

Fonte: Autoria própria (2025).

Pelas imagens presentes na Figura 58 observam-se partículas opacas alinhadas pela imantação indicando que são oriundas de desgaste normal do par Aço x Aço.

4.5.3.3.1 Análise comparativa de ferrografia analítica dos ensaios

Pelos ensaios de ferrografia analítica o óleo de urucum foi o que apresentou um desgaste um pouco mais severo relativamente ao de mamona e ao mineral. Pelo tamanho e quantidade das partículas formadas com a utilização deste óleo, apenas se conclui que as partículas geradas foram mais severas em relação aos outros dois, porém isto não é indicativo de um desgaste severo.

5 CONCLUSÃO

Os estudos e ensaios tribológicos são fundamentais para viabilizar a substituição de lubrificantes minerais por lubrificantes de origem vegetal, uma vez que permitem avaliar com precisão o comportamento de atrito e desgaste em diferentes condições de operação. Lubrificantes vegetais apresentam características promissoras, como alta biodegradabilidade, baixa toxicidade e renovabilidade, mas ainda enfrentam desafios relacionados à estabilidade térmica e à resistência à oxidação.

Nesse contexto, a adição de aditivos baseados em nanopartículas ambientalmente seguras, não tóxicas e biodegradáveis surge como uma estratégia eficaz para melhorar o desempenho tribológico desses biolubrificantes, elevando sua capacidade de proteção contra o desgaste e prolongando sua vida útil. Assim, os ensaios tribológicos tornam-se ferramentas essenciais para validar o uso sustentável e tecnicamente viável de alternativas aos óleos lubrificantes derivados de petróleo.

O presente trabalho demonstrou que os óleos vegetais de mamona e urucum apresentam viabilidade tribológica comparável à de um lubrificante mineral básico. Os resultados obtidos evidenciaram que a adição de nanopartículas de óxido de zinco, bem como o óxido de zinco dopado com molibdênio, contribui significativamente para melhoria das condições tribológicas dos pares de desgaste analisados. A ferrografia analítica indicou que o óleo de urucum apresenta um comportamento tribológico ligeiramente mais severo em comparação aos óleos de mamona e ao mineral básico. Entretanto, os ensaios de perda de massa revelaram que, para o par aço x latão, a adição das três variações de nanopartículas resultou em redução efetiva do desgaste nos três tipos de óleos estudados. No caso do par aço x aço, observou-se que o aditivo dopado apresentou o melhor desempenho quando utilizado com o óleo de mamona, enquanto a combinação das nanopartículas mostrou-se mais eficaz para o óleo de urucum. Para o lubrificante mineral básico, todas as variações dos aditivos proporcionaram benefícios claros na redução do desgaste para o par aço x aço. As variações nas concentrações dos aditivos, podem contribuir para a robustez e abrangência dos resultados apresentados.

Dessa forma, os resultados desta dissertação reforçam a viabilidade do uso de biolubrificantes como alternativa ecológica aos derivados de petróleo, especialmente quando enriquecidos com nanoaditivos adequados. O aprofundamento dessas

investigações, com a exploração de novos sistemas tribológicos e formulações de aditivos, poderá consolidar ainda mais a aplicabilidade técnica e ambientalmente sustentável desses sistemas em diversas aplicações industriais.

5.1 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Diante dos resultados obtidos, recomenda-se como direcionamento a realização dos seguintes estudos adicionais:

- Verificação adicionais sob diferentes condições operacionais, incluindo variações de carga, temperatura, velocidade e diferentes pares tribológicos;
- Investigação do comportamento de distintas concentrações de nanopartículas, com o objetivo de avaliar a estabilidade dos biolubrificantes e validar seu uso em aplicações industriais;
- Exploração da sinergia entre os lubrificantes vegetais e as nanopartículas para otimizar as propriedades tribológicas;
- Aprofundar estudos dos efeitos da oxidação ao longo do uso, visando garantir maior eficiência e durabilidade aos sistemas lubrificados;
- Analisar as superfícies desgastadas, dos pares tribológicos e das esferas ensaiadas.

REFERÊNCIAS

ABDULBARI, H. A.; ZUHAN, N. Grease Formulation from Palm Oil Industry Wastes. *Waste and Biomass Valorization*, Dordrecht, v 9, p. 2447–2457, 2018. DOI: doi.org/10.1007/s12649-018-0237-6.

ACHCAR, K. *Utilização de lubrificantes vegetais em motores de combustão interna: ensaios em equipamentos pin-on-disk*. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia - Universidade Estadual Paulista - UNESP, Ilha Solteira, Ilha Solteira, 2015.

ALEKSBRYBALKO. *Ricinus communis a mamona ou mamona é uma espécie de planta perene da família spurge Euphorbiaceae*. Acesso em 2 de Outubro de 2024, disponível em FREEPIK.

ALMEIDA, I. M. *Análise tribo-termodinâmica da aplicação de nanopartículas de Al₂O₃ como aditivo lubrificante em compressor hermético de refrigeração*. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte(UFRN), Centro de Tecnologia, Natal, 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/21142>. Acesso em: 20 jan. 2025.

ALVES, F. R. *Desenvolvimento de um tribômetro, tipo cilindro sob disco, para ensaios tribológicos em formulações com óleos vegetais*. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Universidade Estadual Paulista "Júlio Mesquita Filho", Ilha Solteira, 2014. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/items/05041d1f-3d19-4862-9923-31197440c174>. Acesso em: 20 jan. 2025.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM D2270 – 10*. West Conshohocken: ASTM, West Conshohocken, 2016.

ASTM D93 - 20. *ASTM D93 Standard Test Methods for Flash Point by Pensky-Martens Closed Cup Tester*. Conshohocken: ASTM, 2020.

ASTM G99 – 23. (Novembro de 2023). Standard Test Method for Wear and Friction Testing with a Pin-on-Disk or Ball-on-Disk Apparatus1. *Normas Internacional*. Bayer, R. G. (2004). *MECHANICAL WEAR FUNDAMENTALS AND TESTING* (2ª ed., rev. e expandido ed.). (M. Dekker, Ed.) NEW YORK.

BLOCK, H.; BANNISTER, K. *Practical Lubrication for Industrial Facilities*. 3rd ed. New York, 2020.

CARRETEIRO, R. P.; BELMIRO, P. *Lubrificantes & lubrificação industrial*. Rio de Janeiro: Interciência: Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, 2006.

CASTRO, R. D.; CURI, E.; MARCELLO, R.; INÁCIO, L.; ROCHA, A. Tribological evaluation of biodegradable and mineral hydraulic oil with sliding between the Cu-Zn and WC-CoCr alloys. *Matéria*, Rio de Janeiro, v. 24, n. 4, p. 1 - 14, 2019. DOI:<https://doi.org/10.1590/S1517-707620190004.0809>

CHAN, C.-H.; TANG, S.; MOHD, N.; LIM, W.; YEONG, S.; IDRIS, Z. Tribological behavior of biolubricant base stocks and additives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Oxford, v. 93, p. 145-157, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.024>

CHANG, T.-S.; YUNUS, R.; RASHID, U.; CHOONG, T.; BIAK, D. A. (20 de Janeiro de 2015). Palm oil derived trimethylolpropane triesters synthetic lubricants and usage in industrial metalworking fluid. *National Library of Medicine*. doi:10.5650/jos.ess14162.

Chaudhary, S., Yadav, S., Singh, R., Sadhotra, C., & Patil, S. (10 de Janeiro de 2022). Extremophilic electroactive microorganisms: Promising biocatalysts for bioprocessing applications. *Pub Med*. doi:10.1016/j.biortech.2021.126663

CHIARELLO, T. G.; TODT, P. Viscosidade dos óleos lubrificantes. *Revista Multidisciplinar do Núcleo do Conhecimento*, [s. l.], v. 1, p. 1-22.2019.

CORDEIRO, S. Z. *Bixa orellana* L. [S. l.], 2019. Disponível em: <https://www.unirio.br/ccbs/ibio/herbariohuni/bixa-orellana-l>. Acesso em: 30 set. 2024.

CORTÉS-TRIVIÑO, E.; VALENCIA, C.; DELGADO, M.; FRANCO, J. Modification of alkali lignin with poly (Ethylene Glycol) Diglycidyl ether to be used as a thickener in bio-lubricant formulations. *Polymers*, San Jose, v. 10, n. 6, p. 670, 2018. DOI: 10.3390/polym10060670.

CUI, Z.; SUN, Y. From tremella-like MoS₂ to α -MoO₃ nanoplates: sintering synthesis and adsorption properties. *Micro e Nano Letters*, Heidelberg, v. 12, n. 9, p. 625-655, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1049/mnl.2017.0045>

DAI, W.; KHEIREDDIN, B.; GAO, H.; LIANG, H. Roles of nanoparticles in oil Lubrication. *Tribology International*, Oxford, v. 102, p. 88-98, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2016.05.020>.

DESANKER, M.; JOHNSON, B.; SEYAM, A.; CHUNG, Y.-W.; BAZZI, H.; DELFERRO, M.; WANG, Q. Oil-soluble silver-organic molecule for in situ deposition of lubricious metallic silver at high temperatures. *ACS Applied Materials & Interfaces*, Washington, v. 8, n. 21, p. 13637-13645, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsami.6b01597>.

DOWSON, D.; TAYLOR, C.; CHILDS, T.; DALMAZ, G.; BERTHIER, Y.; FLAMAND, L.; LUBRECHT, A. *Elastohydrodynamics - '96 fundamentals and applications in lubrication and traction*. Amsterdam: Elsevier Science, 2012.

FOMINSKI, V.; DEMIN, M.; NEVOLIN, V.; FOMINSKI, D.; ROMANOV, R.; GRITSKEVICH, M.; SMIRNOV, N. Reactive Pulsed Laser Deposition of Clustered-Type MoS_x (x ~ 2, 3, and 4) Films and Their Solid Lubricant Properties at Low Temperature. *Nanomaterials*, Basel, v. 10, n. 4, 2020. DOI: 10.3390/nano10040653

FREITAS, M. R. *Síntese e caracterização de nanopartículas de zno dopado e codopado com metais de transição*. 2018. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Tecnologia - Universidade Federal do Paraná - UFPR, Curitiba, 2018. Acesso em: 11 mar. 2025.

GALVÃO, C. F. *Instrumentação e validação de um equipamento pino sobre o disco*. 2019. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Ilha Solteira, 2019.

GARA, L.; ZOU, Q. Friction and Wear Characteristics of Oil-Based ZnO Nanofluids. *Tribology Transactions*, New York, v. 56, p. 236-244, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1080/10402004.2012.740148>.

GHOSH, S.; PADALIA, J.; MOONAH, S. Tissue destruction caused by entamoeba histolytica parasite: cell death, inflammation, invasion, and the gut microbiome. *Current Clinical Microbiology Reports*, Heidelberg, v. 6, n. 1, p. 51-57, 2019. DOI: doi.org/10.1007/s40588-019-0113-6.

HAN, T.; ZHANG, C.; LUO, J. Macroscale superlubricity enabled by hydrated alkali metal ions. *Langmuir*, Washington, v. 34, n. 38, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.8b01722>

HOLMBERG, K.; ERDEMIR, A. Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions. *Friction*, v. 5, p. 263–284, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40544-017-0183-5>.

HU, C.; AI, J.; MA, L.; WEN, P.; FAN, M.; ZHOU, F.; LIU, W. Ester oils prepared from fully renewable resources and their lubricant base oil properties. *ACS Omega*, Washington, v. 6, p. 16343-16355, 2021. DOI: 10.1021/acsomega.1c00808.

HUTCHINGS, I.; SHIPWAY, P. *Tribology friction and wear of engineering materials*. 2nd. ed. Butterworth-Heinemann: C. Gifford, 2017.

KARAK, N. *Vegetable oil-based polymers Properties, processing and applications*. Filadelfia: Woodhead, 2012.

KARIM, Z. A.; SHAHARIN, A. *Alternative fuels for compression ignition engines*. Berlin: Springer Briefs in Energy, 2018.

KIMURA, R. K. *Uso da técnica de análise de óleo lubrificante em motores diesel estacionários, utilizando-se misturas de biodiesel e diferentes níveis de contaminação do lubrificante*. 2012. (Mestrado) Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Ilha Solteira, 2012.

KRISHNASWAMY, K.; ORSAT, V. Sustainable Delivery Systems Through Green Nanotechnology. *In: Nano- and Microscale Drug Delivery Systems*. [S. l.: s. n.], 2017. Cap. 2, p. 10-32. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-52727-9.00002-9>.

KUMAR, P.; TOMAR, V.; KUMAR, D.; JOSHI, R.; NEMIWAL, M. Magnetically active iron oxide nanoparticles for catalysis of organic transformations: a review. *Tetrahedron*, Oxford, v. 106-107, n. 132641, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tet.2022.132641>.

LAGO, D. F. *Manutenção de redutores de velocidade pela integração das técnicas preditivas de análise de vibrações e análise de óleo lubrificante*. Ilha Solteira: UNESP, 2007.

LIEVENS, C. W.; RAYBORN, E. Tribology and the ocular surface. *Clinical Ophthalmology*, Macclesfield, p. 973-980, 2022. DOI: <https://doi.org/10.2147/OPTH.S360293>

LUDEMA, K. C. *Friction, wear, lubrication: a textbook in tribology*. New York: Boca Raton, 1966

MACHINERY LUBRIFICATION- NORIA CORPORATION. Disponível em: <https://www.machinerylubrication.com/Read/411/oil-viscosity>. Acesso em: 6 jul. 2023.

MAHAD, M. A.; CHOUDHURY, I.; MAMAT, A.; YUSOFF, N.; AHMAD, N. B. Vegetable oil-based lubrication in machining: issues and challenges. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, v. 530, p. 1-10, 2019. DOI 10.1088/1757-899X/530/1/012003.

MANG, T.; DRESEL, W. *Lubricants and lubrication*. 2nd. ed. Manhattan: Wiley-Vch, 2007.

MANNEKOTE, J. K.; KAILAS, S.; VENKATESH, K.; KATHYAYINI, N. Environmentally friendly functional fluids from renewable and sustainable sources-A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Oxford, p. 1 - 15. DOI: [doi:10.1016/j.rser.2017.05.274](https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.274).

MARU, M. M. *Estudo do desgaste e atrito de um par metálico sob deslizamento lubrificado*. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade de São Paulo - USP, São Paulo, 2003.

MORAIS, G. A. *Seleção de materiais: não ferrosos*. Natal, Brasil: Edufrn, 2022.

MURRU, C.; BADÍA-LAÍÑO, R.; DÍAZ-GARCÍA, M. Oxidative stability of vegetal oil-based lubricants. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, Washington, v. 9, n. 4, 2021. DOI:10.1021/acssuschemeng.0c06988.

NORTON, R. L. Mancais de rolamento e lubrificação. In: NORTON, R. L. *Projeto de máquinas: uma abordagem integrada*. 4. ed. São Paulo: Bookmam, 2013.

NOWAK, P.; KOSIŃSKA, J.; GLINKA, M.; KAMIŃSKI, M. The Thin-Layer Microchromatography (μ TLC) and TLC-FID Technique as a New Methodology in the Study of Lubricating Oils. *Journal of AOAC International*, Cary, v. 100, n. 4, 1 p. 922-934, 2017. DOI: 10.5740/jaoacint.17-0167.

OH, H.-K.; YEON, K.-H.; KIM, H. The influence of atmospheric humidity on the friction and wear of carbon steels. *Journal of Materials Processing Technology*, Amsterdam, v. 95 n. 1-3, p. 10-16, 1999. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(99\)00259-9](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(99)00259-9)

OLIVEIRA, A. F. *Síntese e caracterização de biolubrificantes obtidos através de modificações químicas no óleo de soja refinado*. 2013. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/1936>. Acesso em: 4 mar. 2025.

PEREIRA, F. M. *Estudo da degradação do óleo lubrificante em motores alimentados com biodiesel B100*. 2015. Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015. Disponível em: https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/1345/1/CT_PPGEM_M_Pereira%2c%20Flavio%20Marcos%20de%20Melo_2015.pdf. Acesso em: 4 mar. 2025.

PEREZ, H. I. Q. *Produção de biolubrificante para usos especiais*. 2009. 117 f. Dissertação (Mestrado em Química) - Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009. DOI: <https://doi.org/10.47749/T/UNICAMP.2009.473883>.

PIRRO, D. M.; WEBSTER, M.; DASCHNER, E. *Lubrication fundamentals*. Exxon Mobil, 2017.

PRIYADARSHANI, M.; SHARMA, R. *Controlling the bandgap of graphene oxide via varying KMnO₄*. Amsterdam: Elsevier, 2024. p. 1-10. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2023.114634>.

RABINOWICZ, E. *Friction and wear of materials*. 2nd. ed. New York, 1995.

RAMESH, A. M., & SHIVANNA, S. Hydrothermal synthesis of MoO₃/ZnO heterostructure with highly enhanced photocatalysis and their environmental interest. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, Amsterdam, v. 9, n. 2, p. 105040, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105040>.

RCD - NOBUG TECNOLOGIA. Acesso em: 8 mar. 2025. Disponível em: <https://rcddistribuidora.com/glossario/a-influencia-do-teor-de-zinco-em-lubrificantes-automotivos/>.

SALEEM, M.; FAROOQ, W.; KHAN, M.; AKHTAR, M.; REHMAN, S.; AHMAD, N.; IRFAN, M. Effect of ZnO Nanoparticles Coating Layers on Top of ZnO Nanowires for Morphological, Optical, and Photovoltaic Properties of Dye-Sensitized Solar Cells. *Micromachines*, Basel, v. 10, n. 12, p. 819, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/mi10120819>.

SANTOS-BELTRÁN, M.; ORNELAS, C.; ROMERO, J.; PARAGUAY-DELGADO, F. Molybdenum oxide particles for dye removal and tribology. *Materials Letters*, Amsterdam, v. 291, p. 129544, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2021.129544>

SILVA, E. F. *Desenvolvimento de lubrificantes verdes: adição de nanopartículas a óleos vegetais e estudo dos desempenhos*. 2023. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Ilha Solteira, 2023.

SINGH, Y.; SINGH, N.; SHARMA, A.; SINGLA, A.; SINGH, D.; RAHIM, E. Effect of ZnO nanoparticles concentration as additives to the epoxidized Euphorbia Lathyrus oil and their tribological characterization. *Fuel*, Oxford, v. 285, p. 1-12, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119148>

SLAVEC, G. A. *Validação tribológica de biograxas sintetizadas comparadas com graxas minerais comerciais*. 2020. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Ilha Solteira 2020.

SOLOMON, S. E.; DOUBLEDAY, P.; LANDRY, J.; JOHN, V.; PESIKA, N. Lubrication mechanisms of dispersed carbon microspheres in boundary through hydrodynamic lubrication regimes. *Journal of Colloid and Interface Science*, Philadelphia, v. 650, p. 1801-181, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2023.07.089>

STACHOWIAK, G.; BATCHELOR, A. W. *Engineering tribology*. 2nd. ed. [S. l.]: Butterworth-Heinemann, 2000.

STOETERAU, R. L. *Tribologia*. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.

SUN, J.; DU, S. Application of graphene derivatives and their nanocomposites in tribology and lubrication: a review. *RSC Advances*, Cambridge, n. 69, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1039/c9ra05679c>

TAHA-TIJERINA, J.; CASTILLO, F.; LEAL, J.; PEÑA-PARÁS, L.; MALDONADO-CORTÉS, D.; CRUZ, C.; GARCÍA, P. Nanoparticles of Zn and ZnO as extreme pressure (EP) additives for lubricants. *Journal of Applied Research and Technology*, Ciudad dem Mexico, p. 394-403, 2018.

TOAZZA, G. F.; SELLITTO, M. A. Estratégia de manutenção preditiva no departamento gráfico de uma empresa do ramo fumageiro. *Revista Produção*, v. 15, n. 3, p. 783-806, 2015. DOI: <https://doi.org/10.14488/1676-1901.v15i3.1623>.

VERGNE, P. Super Low Traction under EHD & Mixed Lubrication Regimes. In: *Superlubricity*. Amsterdam: Elsevier, 2007. p. 1-7. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-044452772-1/50054-8>.

WEARCHECK. Monitoring Oil Degradation With Infrared Spectroscopy. 2000. 8 p. Disponível em: <https://wearcheck.com/resources/techdoc/WZA018.pdf>. Acesso em: 04 mar. 2025.

XU, W.; WU, D.; YANG, T.; SUN, C.; WANG, Z.; HAN, B.; ZHU, D. Genomic insights into the origin, domestication and genetic basis of agronomic traits of castor bean. *Genome Biology*, London, v. 22, n. 113, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13059-021-02333-y>.

YANG, G. B.; YANG, G.; ZHANG, Z.; ZHANG, S.; YU, L.; ZHANG, P. Synthesis and characterization of highly stable dispersions of copper nanoparticles by a novel one-pot method. *Materials Research Bulletin*, Oxford, v. 48, n. 4, p. 1716-1719, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2013.01.025>.

YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. *Física 1: mecânica*. São Paulo: Pearson, 2008. Acesso em: 6 mar. 2025.

YU, Z.; WU, H.; XU, Z.; YANG, Z.; LV, J.; KONG, C. Wearable Noninvasive Glucose Sensor Based on CuxO NFs/Cu NPs Nanocomposites. *Sensors*, Basel, v. 23, n. 2, p. 695, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23020695>.

ZAINAL, N.; ZULKIFLI, N.; GULZAR, M.; MASJUKI, H. A review on the chemistry, production, and technological potential of bio-based lubricants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Oxford, v. 82, p. 80-102, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.004>.

ZAKI, E. G.; MOHAMED, S. S.; ZHIFENG, H.; ELSAEED, S. Special Issue: Recent Trends in Wear and Erosion Resistance of Alloys. *Coatings*, Toronto, v. 13, n. 1, p. 1-64, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings13010064>

ZHAO, J.; HUANG, Y.; HE, Y.; SHI, Y. *Nanolubricant additives: a review*. New York, Springer, 2021. p. 891-917.