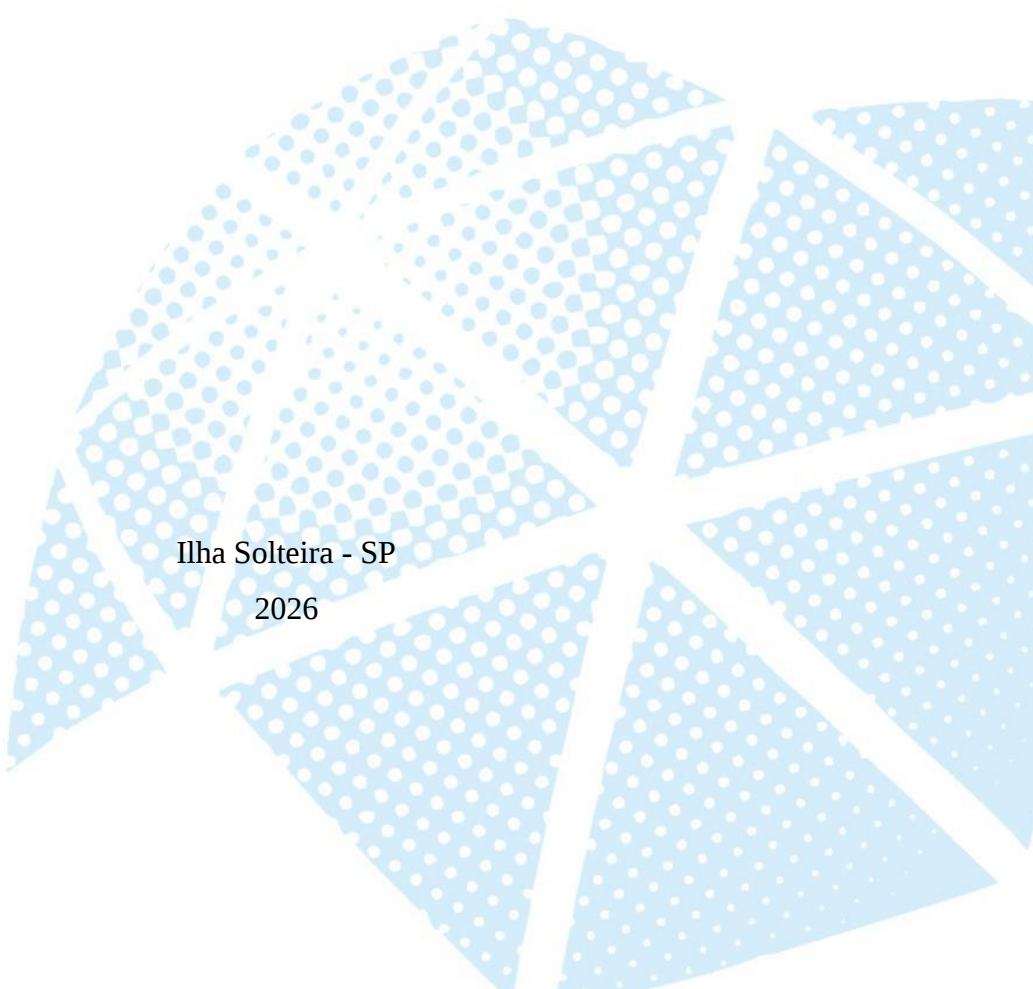


**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

**ALEJANDRO JOSUÉ VARGAS FIGUEROA**

**ESTUDO COMPARATIVO DO DESEMPENHO TRIBOLÓGICO DE  
LUBRIFICANTES MINERAIS E BIOLUBRIFICANTES EM FORMAS  
LÍQUIDAS E PASTOSAS À BASE DE SOJA**

Ilha Solteira - SP  
2026



**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**ALEJANDRO JOSUÉ VARGAS FIGUEROA**

**ESTUDO COMPARATIVO DO DESEMPENHO TRIBOLÓGICO DE  
LUBRIFICANTES MINERAIS E BIOLUBRIFICANTES EM FORMAS  
LÍQUIDAS E PASTOSAS À BASE DE SOJA**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Linha de Pesquisa: Mecânica dos Sólidos.

Orientador: Prof. Dr. Aparecido Carlos Gonçalves

Ilha Solteira - SP

2026

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvida pela Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação

V297e Vargas Figueroa, Alejandro Josué.  
Estudo comparativo do desempenho tribológico de lubrificantes minerais e biolubrificantes em formas líquidas e pastosas à base de soja / Alejandro Josué Vargas Figueroa. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2026  
152 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Mecânica dos Sólidos, 2026

Orientador: Aparecido Carlos Gonçalves  
Inclui bibliografia

1. Coeficiente de atrito. 2. Desgaste. 3. Ferrografia. 4. Pin-on-disk.

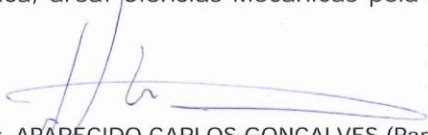
**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: ESTUDO COMPARATIVO DO DESEMPENHO TRIBOLÓGICO DE LUBRIFICANTES MINERAIS E BIOLUBRIFICANTES EM FORMAS LÍQUIDAS E PASTOSAS À BASE DE SOJA

AUTOR: ALEJANDRO JOSUÉ VARGAS FIGUEROA

ORIENTADOR: APARECIDO CARLOS GONCALVES

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica, área: Ciências Mecânicas pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. APARECIDO CARLOS GONCALVES (Participação Presencial)  
Departamento de Engenharia Mecânica / UNESP / Câmpus de Ilha Solteira - FEIS



Prof. Dr. JOSÉ GEDAEL FAGUNDES JUNIOR (Participação Presencial)  
Departamento de Engenharia Mecânica / UNESP / Câmpus de Ilha Solteira - FEIS



Documento assinado digitalmente  
**LUCIANA MONTANARI**  
Data: 27/01/2026 12:02:25-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. dra. LUCIANA MONTANARI (Participação Virtual)  
Departamento de Engenharia Mecânica / Universidade de São Paulo - USP

Ilha Solteira, 27 de janeiro de 2026.

Dedico este trabalho à minha mãe, a meu irmão e  
irmã, à minha avó e minha noiva.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, quero agradecer a Deus, meu Pai Celestial, por me dar esta oportunidade acadêmica e me conceder sabedoria e saúde em todos os momentos. A Ele sejam honra e glória para sempre.

Minha mãe, Lourdes Figueroa, cujo amor, apoio e esforço constante me permitiram realizar muitos dos meus sonhos. Além da coragem que ela demonstrou ao superar os desafios que enfrentou na vida, o que sem dúvida me motivou a sonhar alto e ter a bravura para alcançar meus objetivos.

Aos meus irmãos, Hermes Guzmán e Claudia Guzmán, pelo conselho e incentivo em momentos difíceis, que me deram o conforto de que eu tanto precisava. Por todos os momentos que compartilhamos ao longo dos anos, pelo amor incondicional e pela irmandade que são um tesouro.

À minha avó, Blanca Osorio, por seu amor maternal e sabedoria imensurável, que me inspiraram em inúmeras ocasiões.

À minha noiva, Nicoll Sanabria, pelo seu apoio incondicional e motivação diária, que me ajudaram a superar este desafio acadêmico. Obrigado por ser o apoio perfeito, a amiga que me encorajou e motivou nos dias difíceis, a luz que iluminou aqueles dias que pareciam intermináveis.

Ao meu orientador, Professor Dr. Aparecido Gonçalves, pela sua ajuda oportuna e constante, pela confiança depositada em mim ao longo do meu mestrado, pela valiosa amizade oferecida e por todo o conhecimento que partilhou comigo.

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

"Como não és versado nas coisas do mundo, tudo o que traz um sopro de dificuldade te soa por impossível; entrega-te ao tempo, que costuma abrir saídas doces para as mais amargas aflições." Miguel de Cervantes

## RESUMO

Esta pesquisa se concentrou no comportamento tribológico de lubrificantes vegetais e minerais, utilizando ensaios de tribômetro pino sobre disco. Para avaliar a viabilidade técnica dos biolubrificantes como alternativa sustentável, foram realizadas análises comparativas entre graxas e óleos lubrificantes vegetais e minerais, sob diferentes condições operacionais e com diferentes materiais de disco. A pesquisa abrangeu ensaios físico-químicos e tribológicos, além de técnicas avançadas de diagnóstico, como ferrografia analítica e análise espectrométrica de fluorescência de raios X, que permitiram uma compreensão mais aprofundada dos mecanismos de desgaste envolvidos. O trabalho verificou a capacidade dos lubrificantes vegetais de reduzir o coeficiente de atrito e controlar o desgaste em determinadas condições, bem como identificar suas limitações em outras. Utilizando ferramentas como a ferrografia, foi determinado o tipo e a intensidade do desgaste produzido, aprimorando a interpretação dos resultados. Além disso, a análise elementar das partículas geradas durante os ensaios permitiu uma correlação entre os elementos presentes, a severidade do desgaste e a eficiência do lubrificante aplicado. De modo geral, este estudo reforça o potencial dos lubrificantes à base de plantas como soluções viáveis dentro de uma estratégia de engenharia sustentável, ao mesmo tempo em que destaca a importância de uma avaliação multidimensional e rigorosa para sua validação em ambientes industriais. Portanto, esta pesquisa fornece uma base sólida para futuras explorações no desenvolvimento de tecnologias de lubrificação ecologicamente corretas e eficientes.

**Palavras – chave:** Coeficiente de atrito; Desgaste; Ferrografia; Pin-on-Disk.

## ABSTRACT

This research focused on the tribological behavior of plant-based and mineral-based lubricants using pin-on-disk tribometer tests. To evaluate the technical viability of biolubricants as a sustainable alternative, comparative analyses were conducted between both plant-based and mineral-based lubricating greases and oils under different operating conditions and with different disc materials. The research encompassed physical-chemical and tribological testing, as well as advanced diagnostic techniques such as analytical ferrography and X-ray fluorescence spectrometric analysis, which allowed for a deeper understanding of the wear mechanisms involved. The work verified the ability of plant-based lubricants to reduce the coefficient of friction and control wear under certain conditions, as well as to identify their limitations under others. Using tools such as ferrography, the type and intensity of the wear produced was determined, enhancing the interpretation of the results. Furthermore, elemental analysis of the particles generated during the tests allowed for a correlation between the elements present and the severity of wear and the efficiency of the lubricant applied. Overall, this study reinforces the potential of plant-based lubricants as viable solutions within a sustainable engineering strategy, while highlighting the importance of a multidimensional and rigorous evaluation for their validation in industrial environments. This research therefore provides a solid foundation for future explorations in the development of environmentally friendly and efficient lubrication technologies.

**Keywords:** Coefficient of friction; Wear; Ferrography; Pin-on-Disk.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 – História da tribologia .....                                | 26 |
| Figura 2 – Desgaste em superfícies .....                               | 27 |
| Figura 3 – Superfície de topografia .....                              | 29 |
| Figura 4 – Atrito entre duas superfícies .....                         | 31 |
| Figura 5 – Desgaste abrasivo.....                                      | 34 |
| Figura 6 – Aspereza no material.....                                   | 35 |
| Figura 7 – Desgaste adesivo .....                                      | 36 |
| Figura 8 – Desgaste por fadiga.....                                    | 38 |
| Figura 9 – Desgaste corrosivo .....                                    | 40 |
| Figura 10 – Fluxo de fluido newtoniano .....                           | 43 |
| Figura 11 – Relação entre a temperatura e a viscosidade.....           | 45 |
| Figura 12 – Arranjo de cones para medir o número de consistência.....  | 48 |
| Figura 13 – Características e parâmetros relevantes do tribômetro..... | 56 |
| Figura 14 – Ferrograma .....                                           | 57 |
| Figura 15 – Partícula gerada por atrito .....                          | 58 |
| Figura 16 – Partícula gerada por cisalhamento .....                    | 59 |
| Figura 17 – Partícula de desgaste por deslizamento severo .....        | 59 |
| Figura 18 – Partícula de desgaste do rolamento .....                   | 60 |
| Figura 19 – Partícula de desgaste de engrenagens .....                 | 61 |
| Figura 20 – Partículas de óxido preto .....                            | 61 |
| Figura 21 – Partícula de óxido vermelho.....                           | 62 |
| Figura 22 – Partículas de metais não ferrosos .....                    | 63 |
| Figura 23 – Filtragem por membrana por médio da bomba de vácuo.....    | 65 |
| Figura 24 – Fluxograma de metodologia.....                             | 66 |
| Figura 25 – Torno usado para usinagem dos discos.....                  | 68 |
| Figura 26 – Discos usinados para os ensaios tribológicos.....          | 69 |
| Figura 27 – Durômetro Vickers.....                                     | 69 |
| Figura 28 – Rugosímetro MITUTOYO SJ-201P .....                         | 70 |
| Figura 29 – Viscosímetro Saybolt .....                                 | 71 |
| Figura 30 – Tribômetro tipo pino sobre disco .....                     | 73 |
| Figura 31 – Componentes eletrônicos para aquisição de dados .....      | 73 |
| Figura 32 – Balança analítica de alta precisão .....                   | 78 |

|                                                                                   |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 33 – Separador rotativo de partículas.....                                 | 79  |
| Figura 34 – Partículas filtradas na membrana celulosa .....                       | 80  |
| Figura 35 – Espectrômetro de raios-X.....                                         | 81  |
| Figura 36 – Contador analítico de partículas ferrosas .....                       | 82  |
| Figura 37 – Amostras para o PQA: a) F.F. nodular e b) bronze TM-23 .....          | 83  |
| Figura 38 – Comportamento do CoF em F.F.N. com a graxa e rugosidade 1 .....       | 89  |
| Figura 39 – Comportamento do CoF em F.F.N. com o óleo e rugosidade 1.....         | 91  |
| Figura 40 – Comportamento do CoF em F.F.N. com o óleo e rugosidade 2.....         | 92  |
| Figura 41 – Comportamento do CoF em bronze TM-23 com a graxa e rugosidade 1 ..... | 94  |
| Figura 42 – Comportamento do CoF em bronze TM-23 com o óleo e rugosidade 1.....   | 95  |
| Figura 43 – Comportamento do CoF em bronze TM-23 com a graxa e rugosidade 2.....  | 96  |
| Figura 44 – Comportamento do CoF em bronze TM-23 com o óleo e rugosidade 2.....   | 98  |
| Figura 45 – Desgaste em F.F.N. rugosidade 1 com graxas lubrificantes .....        | 100 |
| Figura 46 – Desgaste em F.F.N. rugosidade 1 com óleos lubrificantes .....         | 100 |
| Figura 47 – Desgaste em F.F.N. rugosidade 2 com óleos lubrificantes .....         | 102 |
| Figura 48 – Desgaste em bronze TM-23 rugosidade 1 com graxas lubrificantes .....  | 103 |
| Figura 49 – Desgaste em bronze TM-23 rugosidade 1 com óleos lubrificantes .....   | 104 |
| Figura 50 – Desgaste em bronze TM-23 rugosidade 2 com graxas lubrificantes .....  | 105 |
| Figura 51 – Desgaste em bronze TM-23 rugosidade 2 com óleos lubrificantes .....   | 105 |
| Figura 52 – Composição química dos lubrificantes puros .....                      | 107 |
| Figura 53 – Concentrações de elementos em amostras de graxa de F.F.N. e r1 .....  | 109 |
| Figura 54 – Concentrações de elementos em amostras de óleo de F.F.N. e r1 .....   | 111 |
| Figura 55 – Concentrações de elementos em amostras de óleo de F.F.N. e r2 .....   | 113 |
| Figura 56 – Concentrações de elementos em amostras de graxa de bronze e r1.....   | 115 |
| Figura 57 – Concentrações de elementos em amostras de óleo de bronze e r1.....    | 117 |
| Figura 58 – Concentrações de elementos em amostras de graxa de bronze e r2.....   | 119 |
| Figura 59 – Concentrações de elementos em amostras de óleo de bronze e r2.....    | 121 |
| Figura 60 – P.Q.I. em amostras de graxa em F.F.N. com rugosidade 1 .....          | 123 |
| Figura 61 – P.Q.I. em amostras de óleo em F.F.N. com rugosidade 1 e 2 .....       | 124 |
| Figura 62 – P.Q.I. em amostras de graxa em bronze com rugosidade 1 e 2 .....      | 125 |
| Figura 63 – P.Q.I. em amostras de óleo em bronze com rugosidade 1 e 2.....        | 127 |
| Figura 64 – Partículas de desgaste em F.F.N. r1 com graxa lubrificante.....       | 128 |
| Figura 65 – Partículas de desgaste em F.F.N. r1 com óleo lubrificante.....        | 130 |
| Figura 66 – Partículas de desgaste em F.F.N. r2 com óleo lubrificante.....        | 131 |

|                                                                              |     |
|------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 67 – Partículas de desgaste em bronze r1 com graxa lubrificante ..... | 132 |
| Figura 68 – Partículas de desgaste em bronze r1 com óleo lubrificante .....  | 133 |
| Figura 69 – Partículas de desgaste em bronze r2 com graxa lubrificante ..... | 134 |
| Figura 70 – Partículas de desgaste em bronze r2 com óleo lubrificante .....  | 136 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 – Números de consistência NLGI.....                             | 49 |
| Tabela 2 – Propriedades físicas do óleo de mamona.....                   | 51 |
| Tabela 3 – Propriedades mecânicas dos discos .....                       | 67 |
| Tabela 4 – Composição química do Ferro Fundido Nodular (% em peso) ..... | 68 |
| Tabela 5 – Composição química do Bronze TM-23 (% em peso) .....          | 68 |
| Tabela 6 – Parâmetros operacionais do tribômetro .....                   | 74 |
| Tabela 7 – Nomenclatura usada para os ensaios no Pin on Disk .....       | 75 |
| Tabela 8 – Dureza Vickers dos discos e pino.....                         | 84 |
| Tabela 9 – Rugosidades dos discos .....                                  | 85 |
| Tabela 10 – Viscosidade dos óleos.....                                   | 86 |
| Tabela 11 – Propriedades das graxas.....                                 | 86 |
| Tabela 12 – Parâmetros operacionais do tribômetro .....                  | 87 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|                |                                                                           |
|----------------|---------------------------------------------------------------------------|
| A              | Área da superfície                                                        |
| API            | <i>American Petroleum Institute</i>                                       |
| ASTM           | <i>American Society for Testing and Materials</i>                         |
| °C             | Graus Celsius                                                             |
| C              | Carbono                                                                   |
| CoF            | Coefficiente de atrito                                                    |
| cSt            | Centistoke                                                                |
| Cu             | Cobre                                                                     |
| DR             | Ferrografia de leitura direta                                             |
| d              | Média das diagonais da indentação                                         |
| ED             | Extrema pressão                                                           |
| EHL            | Elasto-hidrodinâmica                                                      |
| F              | Força de tração                                                           |
| FFN            | Ferro fundido nodular                                                     |
| Fe             | Ferro                                                                     |
| GPa            | Giga pascais                                                              |
| g              | Grama                                                                     |
| H              | Viscosidade cinemática medida a 100°C                                     |
| H <sub>d</sub> | Dureza da aspereza                                                        |
| HV             | Dureza Vickers                                                            |
| h              | Espessura do filme do fluido                                              |
| IV             | Índice de viscosidade                                                     |
| K              | Graus Kelvin                                                              |
| K <sub>a</sub> | Constante determinada pela dureza, forma e número de partículas abrasivas |
| kg             | quilograma                                                                |
| kJ             | quilojoule                                                                |
| km             | quilometro                                                                |
| L              | Viscosidade cinemática medida a 100°C                                     |
| L <sub>p</sub> | Tamanho de partículas maiores                                             |
| MEV            | Microscopia eletrônica de varredura                                       |
| Mg             | Magnésio                                                                  |
| Mn             | Manganês                                                                  |

|                |                                                           |
|----------------|-----------------------------------------------------------|
| MPa            | Megapascals                                               |
| MoS            | Dissulfeto de molibdênio                                  |
| m              | Metro                                                     |
| mL             | Mililitro                                                 |
| µm             | Micrometro                                                |
| mm             | Milímetro                                                 |
| N              | Newton                                                    |
| NLGI           | <i>National Lubricating Grease Institute</i>              |
| nm             | Nanômetro                                                 |
| OCDE           | Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico |
| P              | Fosforo                                                   |
| PLP            | Porcentagem de partículas grandes                         |
| PQA            | Monitor automático de partículas                          |
| PTFE           | Politetrafluoroetileno                                    |
| Pb             | Chumbo                                                    |
| ppm            | Partes por milhão                                         |
| Q              | Carga aplicada                                            |
| Q <sub>a</sub> | Desgaste total causado por aspereza individual            |
| RPD            | Separador rotativo de partículas                          |
| Ra             | Rugosidade média aritmética da superfície                 |
| rpm            | Rotações por minuto                                       |
| S              | Enxofre                                                   |
| SAE            | <i>Society of Automotive Engineers</i>                    |
| Si             | Sílice                                                    |
| Sn             | Estanho                                                   |
| S <sub>p</sub> | Tamanho de partículas menores                             |
| St             | Stoke                                                     |
| s              | Segundo                                                   |
| U              | Viscosidade cinemática medida a 40°C                      |
| U <sub>f</sub> | Velocidade do fluido na superfície                        |
| V              | Volts                                                     |
| W              | Watts                                                     |
| W <sub>t</sub> | Carga normal total aplicada                               |
| W <sub>n</sub> | Carga suportada pela aspereza                             |

|     |                                              |
|-----|----------------------------------------------|
| WPC | Concentração total de partículas de desgaste |
| XRF | Espectroscopia de fluorescência de raios-X   |
| Zn  | Zinco                                        |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|            |                                        |
|------------|----------------------------------------|
| $\Delta V$ | Volume varrido pela aspereza penetrada |
| $\eta$     | Viscosidade dinâmica do fluido         |
| $\mu$      | Coeficiente de atrito                  |
| $\mu_s$    | Coeficiente de atrito estático         |
| $\mu_d$    | Coeficiente de atrito dinâmico         |
| $\nu$      | Viscosidade cinemática do fluido       |
| $\tau$     | Tensão de cisalhamento                 |
| $du/dz$    | Taxa de cisalhamento                   |
| $F_{at}$   | Força de atrito tangencial             |
| $N$        | Força normal                           |

## SUMÁRIO

|       |                                                                  |    |
|-------|------------------------------------------------------------------|----|
| 1     | INTRODUÇÃO .....                                                 | 21 |
| 1.1   | MOTIVAÇÃO .....                                                  | 22 |
| 1.2   | OBJETIVO GERAL .....                                             | 24 |
| 1.2.1 | Objetivos específicos .....                                      | 24 |
| 2     | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....                                      | 25 |
| 2.1   | TRIBOLOGIA .....                                                 | 25 |
| 2.2   | SUPERFÍCIES DE CONTATO .....                                     | 28 |
| 2.3   | ATRITO .....                                                     | 30 |
| 2.4   | DESGASTE .....                                                   | 32 |
| 2.4.1 | Desgaste abrasivo .....                                          | 33 |
| 2.4.2 | Desgaste adesivo .....                                           | 35 |
| 2.4.3 | Desgaste por fadiga .....                                        | 37 |
| 2.4.4 | Desgaste corrosivo .....                                         | 40 |
| 2.5   | VISCOSIDADE .....                                                | 42 |
| 2.5.1 | Viscosidade dinâmica .....                                       | 42 |
| 2.5.2 | Viscosidade cinemática .....                                     | 44 |
| 2.5.3 | Índice de viscosidade .....                                      | 44 |
| 2.6   | LUBRIFICAÇÃO .....                                               | 45 |
| 2.6.1 | Lubrificantes sólidos .....                                      | 46 |
| 2.6.2 | Lubrificante semissólido .....                                   | 47 |
| 2.6.3 | Lubrificantes líquidos .....                                     | 50 |
| 2.7   | TÉCNICAS DE ANÁLISE DE LUBRIFICANTES .....                       | 54 |
| 2.7.1 | Tribômetro Pin on Disk .....                                     | 55 |
| 2.7.2 | Ferrografia analítica .....                                      | 57 |
| 2.7.3 | Ferrografia quantitativa/Ferrografia de leitura direta .....     | 63 |
| 2.7.4 | Filtragem por membrana .....                                     | 64 |
| 3     | MATERIAIS E MÉTODOS .....                                        | 66 |
| 3.1   | PRÉ-ENSAIOS TRIBOLÓGICOS .....                                   | 67 |
| 3.1.1 | Usinagem dos discos .....                                        | 68 |
| 3.1.2 | Ensaio de dureza .....                                           | 69 |
| 3.1.3 | Ensaio de rugosidade .....                                       | 70 |
| 3.1.4 | Ensaio de viscosidade .....                                      | 71 |
| 3.1.5 | Descrição da graxa vegetal à base de sabão de soja (LGQ04) ..... | 71 |
| 3.2   | ENSAIO TRIBOLÓGICO .....                                         | 72 |

|       |                                                                                            |     |
|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.2.1 | Ensaios no Pin on Disk .....                                                               | 72  |
| 3.2.2 | Variáveis operacionais para os ensaios.....                                                | 74  |
| 3.3   | PÓS-ENSAIOS TRIBOLÓGICOS .....                                                             | 77  |
| 3.3.1 | Análise de atrito e desgaste.....                                                          | 78  |
| 3.3.2 | Separador rotativo de partículas (RPD).....                                                | 78  |
| 3.3.3 | Espectroscopia de raios-X (XRF).....                                                       | 81  |
| 3.3.4 | Contador analítico de partículas ferrosas (PQA).....                                       | 82  |
| 4     | RESULTADOS E DISCUSSÕES .....                                                              | 84  |
| 4.1   | ENSAIOS FÍSICO-MECÂNICOS.....                                                              | 84  |
| 4.2   | ENSAIO DE VISCOSIDADE.....                                                                 | 85  |
| 4.2.1 | Propriedades das graxas.....                                                               | 86  |
| 4.3   | ENSAIO TRIBOLÓGICO.....                                                                    | 87  |
| 4.3.1 | Análise do coeficiente de atrito ( $\mu$ ) .....                                           | 89  |
| 4.3.2 | Análise de desgaste.....                                                                   | 99  |
| 4.4   | QUALIFICAÇÃO E QUANTIFICAÇÃO DE ELEMENTOS EM ENSAIOS<br>UTILIZANDO XRF .....               | 107 |
| 4.4.1 | Amostras de graxa lubrificante em F.F.N. com rugosidade 1 .....                            | 108 |
| 4.4.2 | Amostras de óleo lubrificante em F.F.N. com rugosidade 1 .....                             | 110 |
| 4.4.3 | Amostras de óleo lubrificante em F.F.N. com rugosidade 2 .....                             | 112 |
| 4.4.4 | Amostras de graxa lubrificante em bronze TM-23 com rugosidade 1 .....                      | 114 |
| 4.4.5 | Amostras de óleo lubrificante em bronze TM-23 com rugosidade 1 .....                       | 116 |
| 4.4.6 | Amostras de graxa lubrificante em bronze TM-23 com rugosidade 2 .....                      | 118 |
| 4.4.7 | Amostras de óleo lubrificante em bronze TM-23 com rugosidade 2 .....                       | 120 |
| 4.5   | PARTICLE QUANTIFICATION INDEX (P.Q.I.).....                                                | 123 |
| 4.5.1 | Índice P.Q. em amostras de graxa lubrificante em F.F.N. com rugosidade 1 ....              | 123 |
| 4.5.2 | Índice P.Q. em amostras de óleo lubrificante em F.F.N. com rugosidade 1 e 2..              | 124 |
| 4.5.3 | Índice P.Q. em amostras de graxa lubrificante em bronze com rugosidade 1 e 2.....<br>..... | 125 |
| 4.5.4 | Índice P.Q. em amostras de óleo lubrificante em bronze com rugosidade 1 e 2..              | 126 |
| 4.6   | FERROGRAFIA ANALÍTICA.....                                                                 | 128 |
| 4.6.1 | Partículas de F.F.N. com rugosidade 1 e com graxas lubrificantes.....                      | 128 |
| 4.6.2 | Partículas de F.F.N. com rugosidade 1 e com óleos lubrificantes.....                       | 129 |
| 4.6.3 | Partículas de F.F.N. com rugosidade 2 e com óleos lubrificantes.....                       | 131 |
| 4.6.4 | Partículas de bronze com rugosidade 1 e com graxas lubrificantes .....                     | 132 |
| 4.6.5 | Partículas de bronze com rugosidade 1 e com óleos lubrificantes .....                      | 133 |
| 4.6.6 | Partículas de bronze com rugosidade 2 e com graxas lubrificantes .....                     | 134 |
| 4.6.7 | Partículas de bronze com rugosidade 2 e com óleos lubrificantes .....                      | 135 |

|     |                         |     |
|-----|-------------------------|-----|
| 5   | CONCLUSÕES .....        | 137 |
| 5.1 | TRABALHOS FUTUROS ..... | 139 |
|     | REFERÊNCIAS .....       | 141 |

## 1 INTRODUÇÃO

O aumento dos preços do petróleo, o esgotamento das reservas de petróleo bruto no mundo e a demanda por proteção do meio ambiente contra a poluição causada por óleos lubrificantes de origem fóssil e seu derramamento descontrolado renovaram o interesse no desenvolvimento e uso de lubrificantes alternativos. Os óleos biolubrificantes são percebidos como alternativas aos óleos minerais porque possuem certas propriedades técnicas naturais e são biodegradáveis. Comparados aos óleos minerais, os biolubrificantes à base de óleo vegetal geralmente apresentam alta lubricidade, alto índice de viscosidade (IV), alto ponto de fulgor e baixas perdas por evaporação. Tanto a lubrificação limite quanto a hidrodinâmica podem ser obtidas a partir de biolubrificantes devido às suas longas cadeias de ácidos graxos e à presença de grupos polares na estrutura do óleo vegetal (Mobarak *et al.*, 2014).

No mercado global de lubrificação, o aumento dos biolubrificantes é resultado de novas iniciativas ecologicamente corretas e fatores econômicos, como a proteção do meio ambiente de substâncias tóxicas; o esgotamento das reservas mundiais; o aumento dos preços do petróleo; e regulamentações governamentais cada vez mais rigorosas quanto ao uso, operação e descarte de óleos à base de petróleo (Reeves; Siddaiah; Menezes, 2017).

Recentemente, os pesquisadores estimaram que mais de 90% de todos os lubrificantes à base de petróleo poderiam ser substituídos por biolubrificantes, que são feitos de matérias-primas de base biológica, como óleo vegetal, gordura animal, óleo de microalgas e ou outras fontes de hidrocarbonetos ecologicamente corretas como seu componente base (Barbera *et al.*, 2024).

Os óleos vegetais podem atuar como aditivos anti desgaste e modificadores de atrito, devido às fortes interações com as superfícies lubrificadas. Sua natureza anfifílica lhes confere uma boa relação filme/força, devido às longas cadeias de ácidos graxos e à presença de grupos polares na estrutura do óleo vegetal, por essa razão, os lubrificantes à base de óleo vegetal têm a peculiaridade de serem eficazes como lubrificantes de contorno e hidrodinâmicos (Quinchia *et al.*, 2014).

Tanto as lubrificações de contorno quanto as hidrodinâmicas podem ser obtidas a partir de biolubrificantes devido às suas longas cadeias de ácidos graxos e à presença de grupos polares na estrutura do óleo vegetal. O óleo vegetal pode ser obtido de sementes oleaginosas disponíveis em todo o mundo. Segundo relatos, existem 350 culturas oleaginosas disponíveis em todo o mundo. O óleo vegetal pode ser comestível e não comestível. Exemplos incluem jatrofa, karanja, nim, farelo de arroz, colza, mamona, linhaça, mahua, palma, girassol, coco,

soja, oliva e canola(Adhvaryu; Erhan; Perez, 2004a; Atabani *et al.*, 2013; Barbera *et al.*, 2024; Quinchia *et al.*, 2014).

Embora os biolubrificantes possuam muitas características desejáveis como lubricidade, alto índice de viscosidade (VI), alto ponto de fulgor e baixas perdas por evaporação; eles não são amplamente utilizados atualmente devido ao seu desempenho, escala de produção e falta de incentivos de entidades reguladoras. As maiores desvantagens em termos de propriedades dos biolubrificantes são uma baixa estabilidade termo-oxidativa e solidificação em baixa temperatura (Barbera *et al.*, 2024).

Dentre os óleos vegetais, o óleo de mamona se destaca como uma das opções mais versáteis e interessantes devido ao seu alto índice de hidroxila, viscosidade, baixa toxicidade, biodegradabilidade e não ser comestível (ou seja, não compete com a produção para alimentação). Embora as sementes de mamona representem apenas 3% da produção global de sementes de plantas oleaginosas, a extração de óleo de mamona não comestível é facilmente alcançável a partir de plantas de mamona que florescem mesmo em regiões áridas (Lasch *et al.*, 2024).

O desenvolvimento de graxas à base de óleo vegetal (como o óleo de soja a base de sabão de lítio) tem sido uma área de pesquisa ativa há várias décadas. As graxas lubrificantes são dispersões coloidais semissólidas de um agente espessante em uma matriz lubrificante líquida. Sua consistência se deve a uma rede formadora de gel onde o agente espessante é disperso no fluido base lubrificante. Também estão disponíveis estudos sobre a composição, estabilidade oxidativa, mudanças de viscosidade com a temperatura e características de atrito e desgaste de óleos vegetais usados na formulação de graxas. No entanto, uma investigação detalhada ainda é necessária para compreender a natureza e a estrutura da composição metal/ácido graxo nas características físico-químicas da graxa formulada (Adhvaryu; Erhan; Perez, 2004b).

## 1.1 MOTIVAÇÃO

Foi relatado que cerca de 50 a 75% da produção total de lubrificantes é despejada de forma descontrolada no meio ambiente. Cerca de 95% da produção total de lubrificantes é baseada em petróleo, geralmente denominado óleo mineral. Essas formulações são não renováveis e tóxicas, de modo que os lubrificantes são prejudiciais para os seres humanos e o meio ambiente devido à sua baixa biodegradabilidade e alta toxicidade. Por isso, há a

necessidade de desenvolver lubrificantes ambientalmente amigáveis (Cecilia *et al.*, 2020; Reeves; Siddaiah; Menezes, 2017).

A biodegradação é o processo pelo qual substâncias orgânicas são decompostas por enzimas produzidas por organismos vivos. O termo é frequentemente utilizado em relação à ecologia, gestão de resíduos e remediação ambiental (biorremediação). O material orgânico pode ser degradado aerobiamente, com oxigênio, ou anaerobiamente, sem oxigênio. Um termo relacionado à biodegradação é a biomineralização, na qual a matéria orgânica é convertida em minerais. Por definição, a biodegradação é a transformação química de uma substância por organismos ou suas enzimas (Salimon; Salih; Yousif, 2010).

A estrutura de triacilglicerol do óleo vegetal o torna um excelente biolubrificante. Os óleos vegetais oferecem uma série de vantagens, incluindo alta biodegradabilidade (>95%), menor poluição ambiental, compatibilidade com aditivos, baixos custos de produção e amplas possibilidades de produção. Além disso, os óleos vegetais são superiores na capacidade de dissolver contaminantes e aditivos se comparados aos óleos minerais. Ao contrário dos óleos minerais, os óleos vegetais são derivados de uma fonte renovável (Salimon; Salih; Yousif, 2012).

A excelente lubrificação do biolubrificante, a minimização da corrosão das superfícies metálicas, a não toxicidade e a biodegradabilidade, juntamente com a economia de energia, os tornam adequados para uso em todos os campos da indústria. Também se espera que o aumento do uso de bioprodutos reduza o consumo de petróleo, aumente o uso de recursos renováveis, gerencie melhor o ciclo do carbono e possa contribuir para reduzir os impactos adversos no meio ambiente e na saúde (Bilal, 2013).

Os biolubrificantes podem ser utilizados em ambientes sensíveis e prevenir a contaminação devido aos seus benefícios ambientais. Eles podem ser aplicados em diversas aplicações industriais e de manutenção. Algumas de suas aplicações importantes incluem: óleos industriais como óleos para máquinas, óleos para compressores, fluidos para trabalho de metais e óleos hidráulicos; óleos para veículos, como óleos de motor, fluidos de transmissão, óleos para caixas de câmbio, bem como fluidos hidráulicos e de freio; e óleos especiais como óleos de processo, óleos brancos e óleos instrumentais (Singh *et al.*, 2017a).

## 1.2 OBJETIVO GERAL

Analisar comparativamente o comportamento tribológico e o desgaste de pares metálicos compostos de ferro fundido nodular e bronze, lubrificados com agentes de origem mineral e vegetal, por meio de ensaios realizados em tribômetro Pin-on-Disk, a fim de avaliar a eficiência de biolubrificantes contra lubrificantes convencionais em condições controladas de carga e velocidade.

### 1.2.1 Objetivos específicos

- a) Caracterizar as propriedades físico-químicas de lubrificantes selecionados, incluindo graxa mineral e graxa vegetal à base de óleo de soja bem como óleos minerais do tipo PNL-30 e óleo de mamona, utilizando ensaios de viscosidade.
- b) Realizar ensaios tribológicos utilizando um tribômetro pino sobre disco, aplicando condições definidas de carga, velocidade e distancia, para obter dados sobre o coeficiente de atrito e perda de massa em discos de ferro fundido e bronze, lubrificados com os diferentes agentes selecionados.
- c) Analisar o desgaste pós-ensaio resultante utilizando técnicas de separação e observação de partículas, utilizando o Separador Rotativo de Partículas (RPD) para extração de partículas ferromagnéticas e filtração por membrana para ensaios com discos de bronze, complementados por análise morfológica utilizando microscopia óptica.
- d) Quantificar as partículas presentes nos lubrificantes após os ensaios, através da utilização do Monitor Automático de Partículas (PQA), estabelecendo correlações entre a severidade do desgaste e o tipo de lubrificante utilizado.
- e) Determinar a composição elementar das partículas metálicas geradas durante os ensaios utilizando espectrometria de fluorescência de raios X (XRF), a fim de identificar a concentração de elementos de desgaste e sua relação com o par tribológico e o tipo de lubrificante.
- f) Comparar o desempenho de lubrificantes vegetais com o de lubrificantes minerais, considerando parâmetros como atrito, desgaste e a capacidade de proteção contra degradação da superfície de materiais metálicos.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

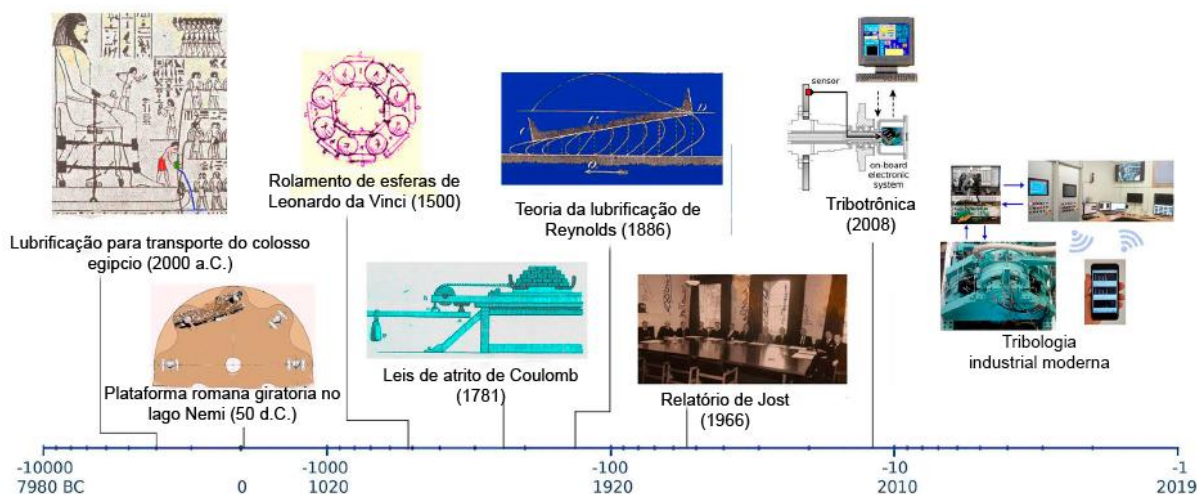
As seções a seguir apresentam a literatura encontrada durante a pesquisa para melhor compreensão dos fundamentos utilizados neste estudo. As seções principais são: Tribologia, Superfícies de Contato, Atrito, Desgaste, Viscosidade, Lubrificação e as Técnicas de Análise de Lubrificantes.

### 2.1 TRIBOLOGIA

Tribologia, que se concentra no atrito, desgaste e lubrificação de superfícies interativas em movimento relativo, é um novo campo da ciência definido em 1966 por um comitê da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE). "Tribologia" deriva da palavra grega "tribos", que significa atrito ou deslizamento. Após um período inicial de ceticismo, como é inevitável para qualquer palavra ou conceito recém-introduzido, a palavra "tribologia" ganhou aceitação gradual. Como a palavra tribologia é relativamente nova, seu significado ainda não é claro para a comunidade em geral, e comparações humorísticas com tribos ou tribólitos tendem a persistir assim que a palavra "tribologia" é mencionada (Gohar; Rahnejat, 2018).

A tribologia, em sua forma tradicional, existe desde o início da história registrada. Há muitos exemplos bem documentados de como as primeiras civilizações desenvolveram rolamentos e superfícies de baixo atrito (Dowson; Hamrock, 1981; Ligier; Noel, 2015; Orndorff Jr, 1985). O estudo científico da tribologia também tem uma longa história, isso pode ser visto na Figura 1, e acredita-se que muitas das leis básicas do atrito, como a proporcionalidade entre a força normal e a força de atrito limitante, tenham sido desenvolvidas por Leonardo da Vinci no final do século XV. No entanto, a compreensão do atrito e do desgaste estagnou por vários séculos, com apenas conceitos fantasiosos para explicar os mecanismos subjacentes.

Figura 1 – História da tribologia



Fonte: Adaptado de Ciulli (2019).

Relativamente pouco conhecimento sobre tribologia foi adquirido até 1886, com a publicação do artigo clássico de Osborne Reynolds sobre lubrificação hidrodinâmica. Reynolds provou que a pressão hidrodinâmica do líquido arrastado entre superfícies deslizantes era suficiente para impedir o contato entre as superfícies, mesmo em velocidades de deslizamento muito baixas. Sua pesquisa teve aplicação prática imediata e levou à remoção de um furo de óleo na linha de carga dos mancais do eixo ferroviário (Hori, 2006).

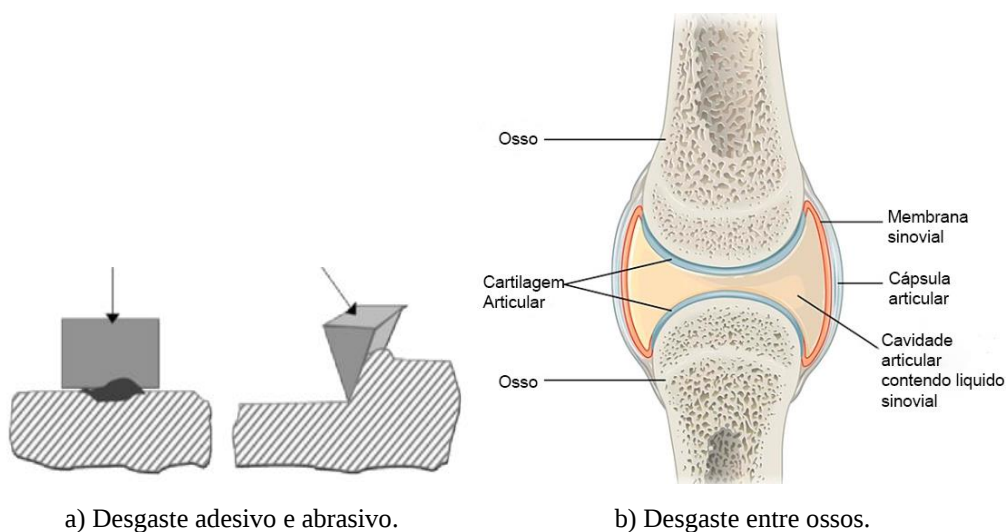
Tribologia é, portanto, um campo científico muito novo, tendo a maior parte do conhecimento sido adquirida após a Segunda Guerra Mundial. Em comparação, muitas disciplinas básicas da engenharia, como termodinâmica, mecânica dos sólidos e ciência dos materiais, são relativamente antigas e bem estabelecidas. A tribologia ainda se encontra em um estado imperfeito e sujeita a algumas controvérsias, o que tem impedido a difusão de informações para tecnólogos em geral Ludema (2001) e Ciulli (2019). A necessidade de informação é, no entanto, crucial; mesmo fatos simples, como o tipo de lubrificante que pode ser usado em uma aplicação específica ou a prevenção da contaminação de óleo pela água, devem ser totalmente compreendidos por um engenheiro.

Desde que o desgaste é a principal causa de desperdício de material e perda de desempenho mecânico, e qualquer redução no desgaste pode resultar em economias consideráveis. O atrito é uma das principais causas de desgaste e dissipação de energia. Economias consideráveis podem ser obtidas com o aprimoramento do controle do atrito. Estima-se que um terço dos recursos energéticos mundiais em uso atualmente seja necessário para superar o atrito de uma forma ou de outra. A lubrificação é um meio eficaz de controlar o

desgaste e reduzir o atrito. A tribologia é um campo da ciência que aplica a análise operacional a problemas de grande importância econômica, como confiabilidade, manutenção e desgaste de equipamentos técnicos, desde eletrodomésticos até naves espaciais (Gohar; Rahnejat, 2018).

A questão é por que "as superfícies interativas em movimento relativo" (que essencialmente significa rolar, deslizar, aproximar ou afastar superfícies como mostrado na Figura 2), são tão importantes para a economia e por que afetam o padrão de vida. A resposta é que a interação das superfícies dita ou controla o funcionamento de praticamente todos os dispositivos desenvolvidos pelo homem. Tudo o que o homem fabrica se desgasta, quase sempre como resultado do movimento relativo entre as superfícies. Uma análise de avarias de máquinas mostra que, na maioria dos casos, as falhas e paragens estão associadas a peças móveis interativas, como engrenagens, rolamentos, acoplamentos, vedações, cames, embreagens, etc. A maioria dos problemas contabilizados são tribológicos. O corpo humano também contém superfícies interativas, por exemplo, articulações humanas, que estão sujeitas a lubrificação e desgaste (Davim, 2011).

Figura 2 – Desgaste em superfícies



Fonte: Adaptado de Ghosh *et al.* (2014).

A tribologia afeta vidas em um grau muito maior do que comumente se percebe. Por exemplo, muito antes do controle deliberado do atrito e do desgaste ser promovido pela primeira vez, seres humanos e animais já modificavam instintivamente o atrito e o desgaste conforme afetavam seus próprios corpos. É de conhecimento geral que a pele humana transpira em resposta ao estresse ou ao medo. Só recentemente foi descoberto que o suor nas palmas das

mãos ou nas solas dos pés de humanos e cães, mas não de coelhos, tem a capacidade de aumentar o atrito entre as palmas ou os pés e uma superfície sólida (Gong; Xue; Wang, 1991).

Em termos simples, parece que o objetivo prático da tribologia é minimizar as duas principais desvantagens do contato sólido com sólido: atrito e desgaste, mas isso nem sempre é o caso. Em algumas situações, minimizar o atrito e maximizar o desgaste, ou minimizar o desgaste e maximizar o atrito, ou maximizar tanto o atrito quanto o desgaste, é desejável. Por exemplo, a redução do desgaste, mas não o atrito, é desejável em freios e embreagens lubrificadas; a redução do atrito, mas não o desgaste, é desejável em lápis; e o aumento tanto do atrito quanto do desgaste é desejável em borrachas (Ludema, 2001).

Avanços substanciais na compreensão tribológica e na aplicação desse conhecimento ocorreram desde que a palavra "tribologia" foi definida pela primeira vez. Basta observarmos os avanços no transporte rodoviário e aéreo, na geração de energia, na tecnologia da informação, nos processos de fabricação e na engenharia médica para ver exemplos importantes. Mas, sem dúvida, novos desenvolvimentos ocorrerão, e é mais importante do que nunca que a compreensão dos princípios da tribologia faça parte da formação de todo engenheiro e cientista aplicado (Hutchings; Shipway, 2017).

Há agora uma conscientização crescente, e há muito esperada, sobre o imperativo de conservar os recursos do planeta, incluindo combustíveis e materiais fósseis. Para reduzir o impacto ambiental da atividade humana, precisa-se não apenas reduzir a liberação atmosférica de carbono fóssil e gerar energia de forma sustentável, mas também utilizar materiais, seja em equipamentos de capital ou em consumíveis como lubrificantes, de forma sustentável e ecologicamente correta. A aplicação correta dos princípios tribológicos não só deve levar a produtos mais duradouros e mais eficientes em termos de energia e recursos, mas também há situações em que sua negligência pode levar a um desempenho inaceitável (Davim, 2011).

## 2.2 SUPERFÍCIES DE CONTATO

Superfícies de sólidos representam uma forma de matéria muito complexa, muito mais complexa do que um mero plano. Existe uma variedade de defeitos e distorções presentes em qualquer superfície real. Essas características superficiais, que variam de distorções volumosas da superfície a irregularidades microscópicas locais, exercem forte influência no atrito e no desgaste. As imperfeições e características de uma superfície real influenciam as reações químicas que ocorrem com líquidos ou lubrificantes em contato, enquanto a rugosidade visível

da maioria das superfícies controla a mecânica do contato entre os sólidos e o desgaste resultante (Stachowiak; Batchelor, 2025).

Imperfeições superficiais em nível atômico são acompanhadas por desvios macroscópicos da planura. Quase todas as superfícies conhecidas são rugosas como ilustrado na Figura 3. Rugosidade significa que a maioria das partes de uma superfície não são planas, mas formam um pico ou um vale. A amplitude típica entre picos e vales para superfícies de engenharia é de cerca de 1  $\mu\text{m}$ . O perfil de uma superfície rugosa é quase sempre aleatório, a menos que algumas características regulares tenham sido introduzidas deliberadamente (Hutchings; Shipway, 2017).

Parâmetros topográficos são geralmente usados para descrever a geometria da superfície. O parâmetro topográfico de superfície mais comumente utilizado para estudos tribológicos é a rugosidade ( $R_a$ ), que é representada pelo perfil de uma seção transversal da superfície, este parâmetro pode ser medido ou calculado usando a seguinte Equação (1):

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |z(x)| dx \quad (1)$$

Onde  $z(x)$  é a função de altura e  $l$  é o comprimento de medição.

Figura 3 – Superfície de topografia



Fonte: Adaptado de Wen *et al.* (2017).

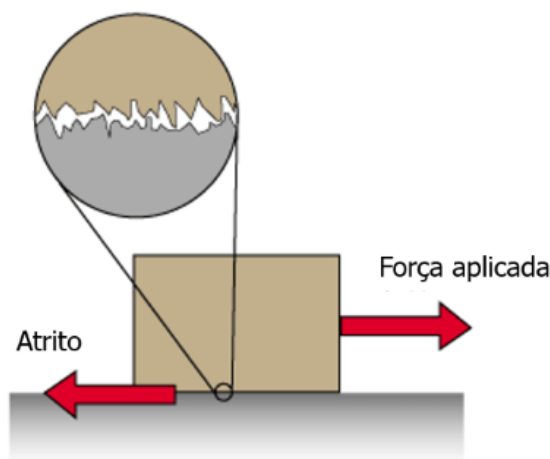
Como essas asperezas constituem os únicos pontos de contato entre as superfícies, elas são responsáveis por suportar a carga normal na superfície e por gerar quaisquer forças de atrito que atuem entre elas. A compreensão da maneira como as asperezas de duas superfícies interage sob cargas variáveis é, portanto, essencial para qualquer estudo de atrito, desgaste ou resistência de contato; é o conceito de contato de aspereza que fornece uma explicação física para muitas observações tribológicas comuns (como o fato de que, para muitos materiais, o coeficiente de atrito é independente da área nominal de contato) (Hutchings; Shipway, 2017).

### 2.3 ATRITO

Embora o tema da tribologia seja muito mais amplo do que um estudo de atrito, o atrito desempenha um papel central no desempenho de muitos sistemas mecânicos. Em alguns casos, baixo atrito é desejável e até essencial. O funcionamento satisfatório de juntas, por exemplo, sejam dobradiças de portas, articulações do quadril humano ou suportes de pontes, exige uma baixa força de atrito. O trabalho realizado para superar o atrito em rolamentos e engrenagens em máquinas é dissipado como calor e, ao reduzir o atrito, pode-se obter um aumento na eficiência geral. Mas o baixo atrito não é necessariamente benéfico em todos os casos. Em freios e embreagens, o atrito adequado e controlado é essencial para dissipar a energia cinética e transferir torque; alto atrito é igualmente desejável entre um pneu de veículo e a superfície da estrada, assim como entre o pé humano e o solo para caminhar (Hirani, 2016).

A força conhecida como atrito pode ser definida como a resistência encontrada por um corpo ao se mover sobre outro como mostrado na Figura 4. A força conhecida como atrito pode ser definida como a resistência encontrada por um corpo ao se mover sobre outro. Em outras palavras, o atrito entre duas superfícies sólidas em movimento relativo, relacionado apenas à interação das superfícies de contato, é chamado de atrito externo. Na lubrificação de contorno, o atrito que ocorre no filme de adsorção ou em outros filmes é considerado atrito externo. No entanto, o atrito induzido pelo movimento relativo das moléculas do fluido é conhecido como atrito interno (Findik, 2014).

Figura 4 – Atrito entre duas superfícies



Fonte: Adaptada de Findik (2014).

A diferença entre atrito externo e interno é que o movimento interno possui características distintas. Para o atrito interno, a velocidade das partículas vizinhas no fluido varia continuamente. Ela possui um gradiente de velocidade específico. No entanto, para o atrito externo, a velocidade de deslizamento na superfície sofre uma mudança abrupta. Além disso, a força de atrito interno é proporcional à velocidade de deslizamento relativa e desaparece quando a velocidade é igual a zero. No entanto, a relação entre o atrito e a velocidade de deslizamento do atrito externo varia com as condições de trabalho, e a força de atrito estático ainda existe quando a velocidade é igual a zero (Findik, 2014; Kchaou *et al.*, 2013).

De acordo com Hirani (2016), a importância do atrito motivou diversos pesquisadores a realizar estudos experimentais e teóricos sobre o assunto. Leonardo da Vinci (1452-1519) foi um dos primeiros experimentadores a realizar estudos quantitativos sobre o atrito. Posteriormente, Amontons também realizou uma série de experimentos por volta do ano de 1670 e estabeleceu as leis do atrito. Posteriormente Coulomb no começo da década de 1780, com base em seus experimentos posteriores, desenvolveu o trabalho de Amontons e derivou três leis clássicas do atrito, como segue:

- Lei 1: A força de atrito é proporcional à carga
- Lei 2: O coeficiente de atrito não está relacionado à área de contato aparente.
- Lei 3: O coeficiente de atrito não está relacionado à velocidade de deslizamento

A Primeira Lei também é frequentemente obedecida para deslizamentos sem lubrificação. Embora a maioria dos metais e muitos outros materiais obedeçam bem à Primeira Lei, polímeros e outros materiais com módulo de elasticidade muito baixo frequentemente não

o fazem. A Segunda Lei do Atrito não foi tão amplamente explorada quanto a Primeira, mas, ainda assim, é bem comprovada para a maioria dos materiais, com exceção, novamente, dos polímeros. A Terceira Lei do Atrito é bem menos fundamentada do que as duas primeiras. É comum observar que a força de atrito necessária para começar o deslizamento é geralmente maior do que a necessária para mantê-lo e, portanto, que o coeficiente de atrito estático ( $\mu_s$ ) é maior do que o coeficiente de atrito dinâmico (ou cinético) ( $\mu_d$ ). Mas, uma vez estabelecido o deslizamento, verifica-se que  $\mu_d$  é praticamente independente da velocidade de deslizamento em muitos sistemas, embora em altas velocidades de deslizamento, da ordem de dezenas ou centenas de metros por segundo para metais,  $\mu_d$  diminua com o aumento da velocidade (Stachowiak; Batchelor, 2025; Wen; Huang, 2017).

Para Kchaou *et al.* (2013), a força tangencial  $F_{at}$  é necessária para mover a parte superior do corpo sobre a superfície de apoio estacionária. A razão entre essa força de atrito e a carga normal  $N$  é conhecida como coeficiente de atrito (CoF) e geralmente é denotada pelo símbolo ( $\mu$ ) e estão relacionados por meio da equação (2):

$$\mu = F_{at}/N \quad (2)$$

A quantidade adimensional conhecida como coeficiente de atrito é a relação entre a força de deslizamento e a força de retenção exercida por duas superfícies em contato. Em outras palavras, é uma medida de quanto o movimento é dificultado devido à atrito entre as superfícies. Quanto maior o coeficiente de atrito, maior será a força de atrito (Salih; Salimon; Yousif, 2011).

## 2.4 DESGASTE

O desgaste pode ser definido como dano superficial devido ao deslocamento do material sem alteração líquida de volume ou peso. Pode ocorrer como consequência natural e principalmente por meio de interações superficiais em asperezas. O desgaste é fortemente influenciado pelas condições operacionais e pelas propriedades do material, é uma resposta do sistema (Zhang *et al.*, 2012).

Às vezes, presume-se erroneamente que alto atrito significa altas taxas de desgaste. Mas isso não é verdade. Interfaces com lubrificantes sólidos e polímeros apresentam atrito relativamente baixo, mas alto desgaste, enquanto cerâmicas apresentam atrito moderado com desgaste extremamente baixo. Em alguns casos isolados, atrito e desgaste podem estar

correlacionados. Mas, em geral, atrito e desgaste são duas respostas distintas do sistema (Affatato; Ruggiero; Merola, 2015).

Sempre que superfícies se movem umas sobre as outras, ocorre desgaste, danos a uma ou ambas as superfícies, geralmente envolvendo perda progressiva de material. Às vezes, o desgaste é imperceptivelmente leve, mas também pode ser extremamente rápido. Na maioria dos casos, o desgaste é prejudicial, talvez causando folgas maiores entre os componentes móveis, liberdade de movimento indesejada e perda de precisão. Frequentemente, isso leva à vibração, ao aumento da carga mecânica e ao desgaste ainda mais rápido, e às vezes à falha por fadiga (Stachowiak; Batchelor, 2025).

A perda por desgaste de quantidades relativamente pequenas de material pode ser suficiente para causar a falha completa de máquinas grandes e complexas, e infelizmente há casos em que as causas básicas de grandes desastres de engenharia podem ser atribuídas ao desgaste. Altas taxas de desgaste, no entanto, às vezes são desejáveis. Retificação e polimento, por exemplo, são processos de fabricação amplamente utilizados que empregam o desgaste para remover material de forma controlada, e um pequeno desgaste inicial é frequentemente previsto e até mesmo bem-vindo durante o processo de "amaciamento" em alguns tipos de máquinas (Dong *et al.*, 2023).

O desgaste é um fenômeno que ocorre em todo equipamento que tem partes em contato. Existem mais de 34 tipos conhecidos de desgaste, porém quatro são os mais comumente encontrados, são o contato superfície com superfície (desgaste adesivo e desgaste por fadiga); contato superficial com substâncias estranhas (desgaste abrasivo); e erosão por materiais corrosivos (desgaste corrosivo) (Hwang *et al.*, 1999).

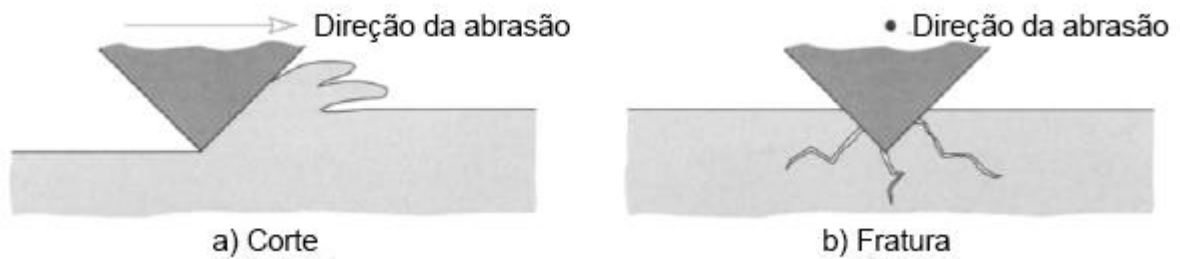
#### **2.4.1 Desgaste abrasivo**

O desgaste abrasivo ocorre sempre que um objeto sólido é carregado contra partículas de um material que tem dureza igual ou maior como ilustrado na Figura 5. A extensão do desgaste abrasivo é muito maior do que se imagina. Qualquer material, mesmo que a maior parte seja muito macio, pode causar desgaste abrasivo se houver partículas duras (Hirani, 2016).

Uma grande dificuldade na prevenção e no controle do desgaste abrasivo é que o termo "desgaste abrasivo" não descreve precisamente os mecanismos de desgaste envolvidos. De fato, quase sempre existem diversos mecanismos de desgaste atuando em conjunto, todos com características distintas (Hase; Mishina; Wada, 2012).

Uma partícula abrasiva se move ao longo de uma superfície sólida, produzindo desgaste superficial, denominado desgaste abrasivo de dois corpos. Se uma partícula abrasiva se move paralelamente a uma superfície sólida Figura 5 a), a tensão de contato na superfície é baixa, de modo que arranhões ou pequenos sulcos aparecem na superfície. Se a partícula abrasiva se move perpendicularmente à superfície sólida Figura 5 b), o desgaste causado é denominado desgaste por impacto. Nessa situação, a partícula colide com a superfície sob alta tensão, de modo que uma ranhura profunda é perfurada na superfície e o material específico de grande porte é desprendido da superfície. A capacidade de desgaste por impacto está relacionada à energia do impacto (Wen; Huang, 2017).

Figura 5 – Desgaste abrasivo



Fonte: Adaptado de Stachowiak (2025).

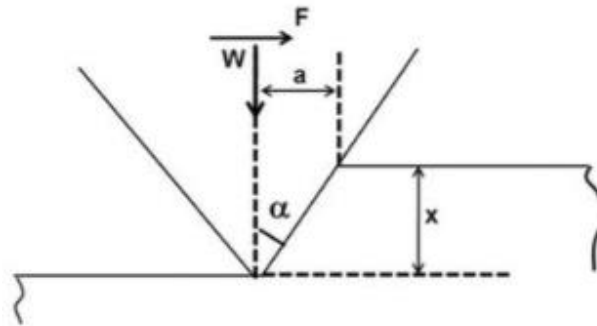
O desgaste abrasivo é a forma mais comum de desgaste. Segundo estatísticas, cerca de metade da perda total por danos causados pelo desgaste na produção é causada por desgaste abrasivo, portanto, o estudo do desgaste abrasivo é muito importante. Em geral, o mecanismo de desgaste abrasivo é a ação de arado da partícula abrasiva, sendo, portanto, um processo de micro corte. Claramente, a dureza relativa do material às partículas abrasivas, a carga e a velocidade de deslizamento desempenham papéis importantes no desgaste abrasivo (Hase; Mishina; Wada, 2012).

Hirani (2016), por causa de esse tipo de desgaste é um dos mais presentes em diferentes processos, é interessante quantificar as cargas e os parâmetros que estão relacionados. A carga suportada pela aspereza (Figura 6), a qual é considerada a metade da área de cada aspereza,  $n$  é dada pela Equação (3):

$$W_n = H_d \left( \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot a^2 \right) \quad (3)$$

Onde  $H_d$  é a dureza.

Figura 6 – Aspereza no material



Fonte: Adaptado de Hirani (2016).

Agora o volume varrido pela aspereza penetrada pode ser considerado como mostrado pela Equação (4):

$$\Delta V = \frac{W_n \cdot x}{0,5 \cdot \pi \cdot H_d \cdot \tan \alpha} \quad (4)$$

E o desgaste total é a soma do desgaste causado por aspereza individual (mesma geometria de cada aspereza) é mostrado pela Equação (5):

$$Q = K \cdot \frac{W}{H_d} \quad (5)$$

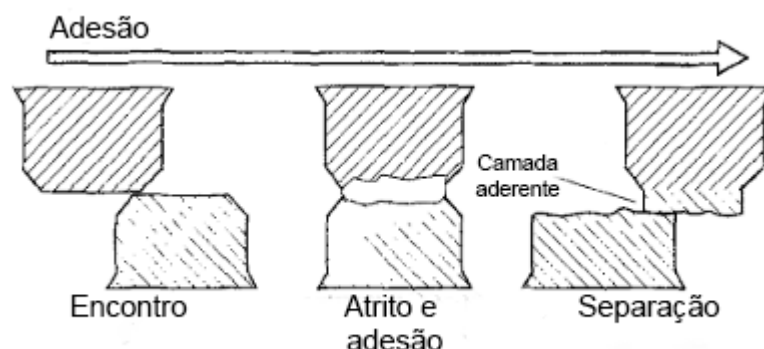
Onde W é a carga normal total aplicada e K é a constante determinada pela dureza, forma e número de partículas abrasivas no corte.

#### 2.4.2 Desgaste adesivo

O desgaste adesivo é uma forma muito grave de desgaste, caracterizada por altas taxas de desgaste e um alto coeficiente de atrito instável. Quando um pico de uma superfície entra em contato com um pico da outra superfície, pode ocorrer um micro soldagem instantânea devido ao calor gerado pelo atrito resultante. Isso resulta no desprendimento ou transferência de material de uma superfície para a outra, como ilustrado na Figura 7. Contatos deslizantes podem ser rapidamente destruídos pelo desgaste adesivo e, em casos extremos, o movimento deslizante pode ser impedido por coeficientes de atrito ou gripagem muito altos. Metais são

particularmente propensos ao desgaste adesivo, daí sua importância prática (Hutchings; Shipway, 2017).

Figura 7 – Desgaste adesivo



Fonte: Adaptado de Mair *et al.* (1996).

A maioria dos sólidos adere ao contato com outro sólido até certo ponto, desde que certas condições sejam satisfeitas. A adesão entre dois objetos colocados casualmente juntos não é observada devido à presença de camadas contaminantes de oxigênio, água e óleo. Além das condições de lubrificação e do desempenho do material de atrito, os principais fatores externos que afetam o desgaste do adesivo são a carga e a temperatura da superfície (Hwang *et al.*, 1999).

A adesão também é reduzida com o aumento da rugosidade ou dureza da superfície dos corpos em contato. A observação real da adesão tornou-se possível após o desenvolvimento de sistemas de alto vácuo, que permitiram a preparação de superfícies livres de contaminantes (Lebedeva; Presnyakova, 1991; Miyoshi, 1999).

Experimentos de adesão e deslizamento realizados em alto vácuo mostraram um comportamento tribológico totalmente diferente de muitos materiais comuns em relação ao observado ao ar livre. Superfícies metálicas livres de filmes de óxido em alto vácuo apresentaram as mudanças mais drásticas e, em parte por esse motivo, têm sido amplamente estudadas (Klaasen *et al.*, 2010; Krumpiegl *et al.*, 1999; Song *et al.*, 2020).

A forte adesão observada entre metais pode ser explicada pela transferência de elétrons entre superfícies em contato. Numerosos elétrons livres estão presentes nos metais e, em contato, elétrons podem ser trocados entre os dois sólidos para estabelecer a ligação. Os elétrons não estão ligados por uma estrutura rígida e, desde que a distância entre dois corpos em contato seja suficientemente pequena ( $<1$  nm), eles podem se mover de um corpo para outro; como

resultado, os elétrons podem ligar dois sólidos, apesar de suas diferentes estruturas atômicas (Budinski, 2011).

Todos os metais apresentam uma forte tendência a aderir em contato com outro sólido, mas existem diferenças significativas entre elementos específicos. Os metais existem principalmente em quatro tipos principais de estrutura cristalina: cúbica de face centrada, cúbica de corpo centrado, hexagonal compactada e tetragonal. Foi descoberto experimentalmente que metais com estrutura hexagonal compactada apresentam muito menos adesão do que outras estruturas cristalinas (Buckley; Johnson, 1968; Godino *et al.*, 2020).

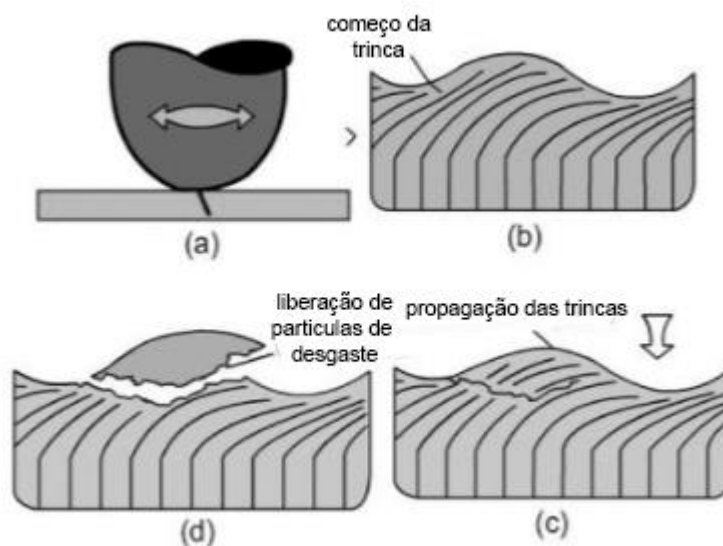
Acredita-se que a razão para a diferença na adesão entre metais de dureza semelhante resida na necessidade de algum grau de deformação plástica entre as asperezas antes que um contato verdadeiro possa ser estabelecido. Metais hexagonais compactados possuem muito menos sistemas de deslizamento e, portanto, são menos dúcteis do que metais com faces centradas e corpos centrados, o que resulta em sua menor adesão (Hsu; Ying, 2012).

A adesão entre metais também é influenciada pela "reatividade química" ou eletropositividade dos metais individuais. Metais quimicamente ativos, como o alumínio, ligam-se mais facilmente e, portanto, apresentam adesão mais forte do que metais nobres. Isso sugere que metais de estrutura cristalina cúbica de face centrada e com alto nível de atividade química apresentariam uma adesão particularmente forte. Esses metais geralmente são inadequados para contatos deslizantes não lubrificados (Briscoe, 1981; Hsu; Ying, 2012).

### **2.4.3 Desgaste por fadiga**

Em muitos contatos bem lubrificados, a adesão entre as duas superfícies é insignificante, mas ainda assim há uma taxa significativa de desgaste. Esse desgaste é causado por deformações sofridas pelas asperezas e camadas superficiais quando as asperezas de superfícies opostas entram em contato. Contatos entre asperezas acompanhados por tensões locais muito elevadas se repetem inúmeras vezes durante o deslizamento ou a laminação, e partículas de desgaste são geradas por trincas propagadas por fadiga como ilustrado na Figura 8, daí o termo "desgaste por fadiga" (Hirani, 2016).

Figura 8 – Desgaste por fadiga



Fonte: Adaptado de Hirani (2016).

O termo "fadiga de contato" ou "fadiga de superfície", comumente utilizado na literatura, é um jargão técnico para danos superficiais causados por um contato de rolamento repetido. Refere-se ao dano inicial em uma superfície lisa e é mais frequentemente usado no contexto de rolamentos (Hutchings; Shipway, 2017).

As evidências acumuladas sugerem que o desgaste por fadiga durante o deslizamento é resultado do desenvolvimento de fissuras na camada superficial deformada. Isso também parece ser corroborado por uma proporcionalidade observada entre a espessura média das partículas de desgaste e a espessura da camada deformada (Zhang *et al.*, 2021).

Foi demonstrado em experimentos de desgaste e fadiga conduzidos com metais quimicamente ativos e nobres sob diversas pressões que esse tipo de desgaste é fortemente afetado pela presença de oxigênio. Por exemplo, as taxas de desgaste é a recíproca da vida útil em fadiga em função da pressão atmosférica para metais quimicamente ativos. Esse fenômeno pode ser explicado pela capacidade dos metais de formar filmes de óxido nas proximidades das pontas das trincas. Superfícies de níquel e cobre formam rapidamente filmes de óxido quando expostas ao ar, enquanto o ouro forma, no máximo, uma camada adsorvida de oxigênio (Soda; Kimura; Tanaka, 1977).

Durante o contato deslizante entre dois corpos, grande parte do dano causado ao material de cada corpo ocorre abaixo das superfícies deslizantes. Uma superfície desgastada pode permanecer bastante lisa e apresentar danos óbvios, enquanto alguns micrômetros abaixo da

superfície ocorrem processos que levam à formação de uma partícula de desgaste (Wen; Huang, 2017).

Quando duas superfícies são colocadas em contato deslizante, a topografia de aspereza aleatória em ambas as superfícies é logo substituída por uma superfície lisa ou uma série de ranhuras alinhadas na direção do deslizamento. Se os dois materiais deslizantes diferem em dureza, o material mais macio perde suas asperezas primeiro, mas as da superfície mais dura também acabam desaparecendo (Luo, 2010).

Deve-se observar que, em condições secas, o desgaste por formação de trincas ou corrosão por pites e lascas também pode ocorrer quando as tensões de contato são excessivamente altas. Este último é especialmente notável em sólidos frágeis, como cerâmicas de óxido, que tendem a se desgastar por corrosão por pites ou formação de trincas sob contatos de rolamento (Luo, 2010).

Zhang *et al.* (2021), em termos gerais, as causas da fadiga de contato podem ser resumidas como sendo devidas a limitações do material de laminação, lubrificação ou condições operacionais. O material para os contatos de laminação deve ser de altíssima qualidade, pois quaisquer imperfeições presentes podem atuar como locais de iniciação para o desenvolvimento de trincas.

De acordo com Hakami *et al.* (2017) e Aboulkhair *et al.* (2016), o acabamento superficial também deve ser de alta qualidade, pois as trincas podem se originar de imperfeições e irregularidades superficiais. A presença de um lubrificante pode ter um efeito significativo na fadiga de contato, impedindo o contato real entre os corpos rolantes.

Imperfeições do material, como inclusões, contornos de grãos fracos e zonas de alta tensão residual, são uma importante fonte de locais de iniciação para o desenvolvimento de trincas e formação de partículas de desgaste. Todos esses fatores podem causar fadiga de contato. Inclusões são particularmente prejudiciais à resistência à fadiga de contato e devem ser evitadas sempre que possível (Murakami, 2012).

A falha por fadiga de contato pode se desenvolver a partir de defeitos superficiais ou subsuperficiais. Portanto, existem dois modos de fadiga de contato, superficial e subsuperficial, que produzem cavidades com formatos distintamente diferentes (Ruijie *et al.*, 2023).

O modo superficial de fadiga de contato está associado à falha causada por espessura de filme insuficiente, rugosidade superficial excessiva ou detritos superdimensionados presentes no lubrificante. Espessura de filme insuficiente ou rugosidade superficial excessiva afetam a fadiga de contato por meio das interações de aspereza (Xia *et al.*, 2024).

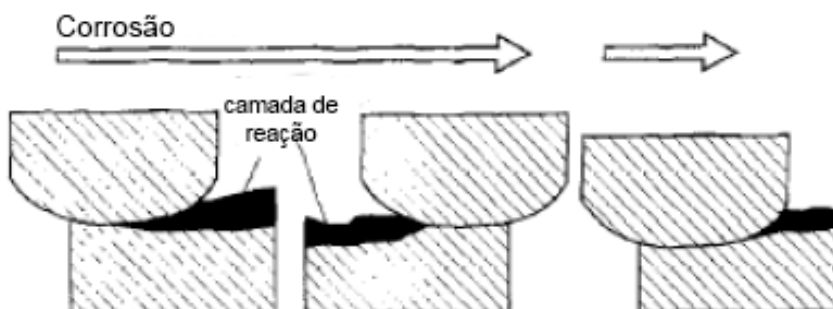
O modo de falha subsuperficial é geralmente causado por trincas que se propagam a partir de imperfeições do material situadas próximas ao plano de tensão de cisalhamento máxima dentro do contato hertziano. O modo de falha de contato originado na superfície é frequentemente conhecido como falha por escamação, devido aos detritos semelhantes a escamas gerados. No entanto, detritos finos semelhantes a escamas também podem ser gerados no modo de falha de contato subsuperficial (Holweger *et al.*, 2012).

Considerando que o lubrificante desempenha um papel crítico na natureza do desgaste por rolamento e da fadiga de contato. Além de sua capacidade de formar uma película lubrificante que separa as superfícies de interação, os componentes químicos do lubrificante podem exercer alguma influência sobre o desgaste e a fadiga nos contatos de rolamento. As películas de lubrificação elasto-hidrodinâmica (EHL) modificam as distribuições hertzianas de pressão e tração. Elas também influenciam o número e a gravidade das interações de aspereza e afetam as concentrações de tensões nas proximidades dos defeitos superficiais (Cao; Khan; Meng, 2020; Paulson; Sadeghi; Habchi, 2017; Vijay; Sadeghi, 2022).

#### 2.4.4 Desgaste corrosivo

O desgaste corrosivo ocorre em uma ampla variedade de situações, com ou sem lubrificação. A causa fundamental desse tipo de desgaste é uma reação química entre o material desgastado e um meio corrosivo como ilustrado na Figura 9, que pode ser um reagente químico, um lubrificante reativo ou até mesmo o ar. Desgaste corrosivo é um termo geral que se refere a qualquer forma de desgaste dependente de um processo químico ou corrosivo (Hirani, 2016; Wen; Huang, 2017).

Figura 9 – Desgaste corrosivo



Fonte: Adaptado de Mair *et al.* (1996).

A supressão do desgaste adesivo é dominada pela formação de películas lubrificantes duráveis. Se tais películas prevalecerem, os contatos desgastados estarão bem lubrificados e o desgaste corrosivo não ocorrerá. Infelizmente, pouquíssimas películas de produtos de corrosão são duráveis, de modo que essa categoria de formação de película raramente é observada na prática (Wen; Huang, 2017).

A destruição da película em contato, mas com o desgaste adesivo ainda suprimido, está relacionada à formação de uma película de produtos de corrosão de sacrifício ou de curta duração sob os contatos deslizantes. Esta é a forma mais comum de desgaste corrosivo, visto que a maioria das películas de corrosão consiste em óxidos frágeis ou outros compostos iônicos. Por exemplo, os óxidos de ferro são extremamente frágeis em todas as temperaturas, exceto em temperaturas muito altas. Durante esse processo, o desgaste corrosivo ocorre nas áreas ativas da superfície desgastada. As áreas ativas, que são equivalentes à área de contato real, corroem ativamente em comparação com a superfície passivada circundante (Diomidis *et al.*, 2010; Trausmuth *et al.*, 2015).

Em cargas moderadas, o desgaste é inteiramente resultado da corrosão rápida nessas áreas ativas, que são regeneradas pela remoção mecânica da película durante o contato deslizante. Em cargas mais altas, um mecanismo adicional de desgaste subsuperficial pode causar um rápido aumento do desgaste (Diomidis *et al.*, 2010).

A transição entre corrosão, suficiente para gerar películas protetoras e desgaste adesivo, está presente na maioria dos sistemas. A transição depende da carga, visto que, à medida que a carga aumenta, mais asperezas de superfícies opostas entram em contato a qualquer momento, de modo que o tempo médio entre contatos sucessivos para qualquer aspereza é reduzido. Consequentemente, uma maior reatividade aditiva ou do meio é necessária quando a carga aumenta (Nehme; Mourhatch; Aswath, 2010).

Em baixas temperaturas, os filmes de óxido são extremamente benéficos, pois se formam rapidamente e suprimem eficazmente o desgaste adesivo. Se um sistema operar em condições oxidativas moderadas, o desgaste é bastante reduzido. As camadas de óxido formadas são suportadas pelas camadas do substrato endurecidas por deformação, geradas devido à deformação plástica. Em altas temperaturas, no entanto, a oxidação assemelha-se à corrosão em sua alta taxa de reação e pode se tornar uma causa direta do aumento do desgaste. Essa rápida oxidação em altas temperaturas forma a base do desgaste oxidativo (Wen; Huang, 2017).

No início do contato deslizante, em alta velocidade, as finas películas de óxido presentes nas superfícies de metais não desgastadas são rapidamente destruídas e as taxas de atrito e desgaste aumentam, iniciando um período de desgaste severo. Então, por meio de alguns

processos pouco compreendidos, a superfície desgastada se recupera e um estado de desgaste moderado é atingido. As camadas espessas de óxido se estabelecem e a taxa de desgaste diminui acentuadamente. Quando cada camada de óxido atinge uma espessura crítica, torna-se fraca demais para suportar a carga e a tensão de cisalhamento por atrito, sendo removida durante o deslizamento (Yetim, 2010).

## 2.5 VISCOSIDADE

O parâmetro que desempenha um papel fundamental na lubrificação é a viscosidade do óleo. Óleos diferentes apresentam viscosidades diferentes. Além disso, a viscosidade do óleo muda com a temperatura, taxa de cisalhamento e pressão, e a espessura da película de óleo gerada geralmente é proporcional a ela. Portanto, à primeira vista, parece que os óleos mais viscosos apresentariam melhor desempenho, pois as películas geradas seriam mais espessas e uma melhor separação das duas superfícies em contato seria alcançada. Infelizmente, isso nem sempre é o caso, pois óleos mais viscosos exigem mais potência para serem cisalhados (Hirani, 2016).

A propriedade mais importante de um óleo para fins de lubrificação é a sua viscosidade. A viscosidade fornece uma medida da resistência de um fluido ao fluxo de cisalhamento e pode ser definida como a tensão de cisalhamento em um plano dentro do fluido, por gradiente de velocidade unitária normal a esse plano (Hutchings; Shipway, 2017).

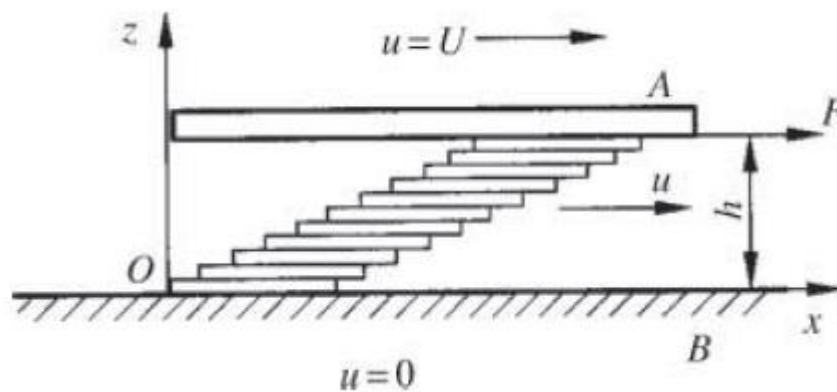
Em aplicações de engenharia, a viscosidade do óleo é geralmente escolhida para proporcionar o desempenho ideal na temperatura necessária. Conhecer a temperatura na qual o óleo deve operar é fundamental, pois a viscosidade do óleo é extremamente dependente da temperatura. A viscosidade de diferentes óleos varia em taxas diferentes com a temperatura. Ela também pode ser afetada pelas velocidades das superfícies de operação (taxas de cisalhamento). O conhecimento das características de viscosidade de um lubrificante é, portanto, muito importante no projeto e na previsão do comportamento de um sistema mecânico lubrificado (Hutchings; Shipway, 2017).

### 2.5.1 Viscosidade dinâmica

Newton propôs pela primeira vez o modelo de fluido viscoso. Ele considerou que um fluxo de fluido consiste em muitas camadas muito finas. As camadas adjacentes deslizam relativamente, como mostrado na Figura 10, onde  $h$  é a espessura,  $U$  é a velocidade da superfície

móvel,  $A$  é a área da superfície e  $F$  é a força de tração. Devido ao atrito viscoso dentro das camadas do fluido, o movimento é transferido de uma camada para a próxima. Devido à viscosidade, o deslizamento relativo entre as camadas resulta em tensão de cisalhamento, ou seja, atrito dentro do fluido. O movimento é transferido para a camada adjacente de forma que a camada mais rápida é desacelerada, mas a camada mais lenta é acelerada. Isso forma uma diferença de velocidade. Se as superfícies  $A$  e  $B$  são paralelas entre si, a distribuição da velocidade  $u$  é linear (Kurre; Yadav, 2023).

Figura 10 – Fluxo de fluido newtoniano



Fonte: Adaptado de Stachowiak *et al.* (2025).

Newton assumiu que a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento são proporcionais entre si, o que é conhecido como lei da viscosidade de Newton, dada pela Equação (6):

$$\tau = \eta \cdot \frac{du}{dz} \quad (6)$$

Onde  $\tau$  é a tensão de cisalhamento,  $du/dz$  é a taxa de cisalhamento e  $\eta$  é definida como a viscosidade dinâmica do fluido.

A viscosidade dinâmica é a razão entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento. No Sistema Internacional de Unidades (SI), a unidade de viscosidade dinâmica é  $\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$  ou  $\text{Pa}\cdot\text{s}$  (Stachowiak; Batchelor, 2025).

### 2.5.2 Viscosidade cinemática

A viscosidade cinemática é frequentemente usada em vez da viscosidade dinâmica. A viscosidade cinemática é igual à razão entre a viscosidade dinâmica de um fluido e sua densidade. Se a densidade for  $\rho$  e a viscosidade dinâmica for  $\eta$ , a viscosidade cinemática  $\nu$  é expressa pela Equação (7):

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (7)$$

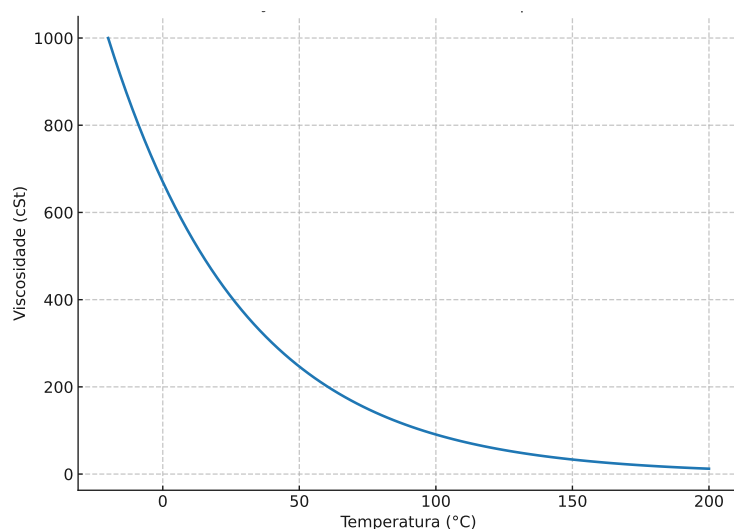
A unidade de viscosidade cinemática no SI é  $\text{m}^2/\text{s}$ , e no sistema CGS é o Stoke (St),  $1\text{St} = 102 \text{ mm}^2/\text{s} = 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ . Como St é muito grande, cSt (centi St) é mais comumente usado na prática;  $1 \text{ cSt} = 1 \text{ mm}^2/\text{s}$  (Stachowiak; Batchelor, 2025).

### 2.5.3 Índice de viscosidade

O índice de viscosidade (VI – *Viscosity Index*) é um número adimensional utilizado para expressar o comportamento viscosidade-temperatura dos óleos lubrificantes. Quanto menor o VI, mais a viscosidade é afetada pelas mudanças de temperatura. Quanto maior o VI, menos sensível é a viscosidade às mudanças de temperatura (Soltani *et al.*, 2020).

Do ponto de vista da engenharia, havia a necessidade de um parâmetro que descrevesse com precisão as características de viscosidade-temperatura dos óleos. Em 1929, Dean e Davis desenvolveram um "Índice de Viscosidade" Dean *et al.* (1929) e Davis *et al.* (1932). O índice de viscosidade é um parâmetro inteiramente empírico que compara a viscosidade cinemática do óleo de interesse com as viscosidades de dois óleos de referência que apresentam uma diferença considerável na sensibilidade da viscosidade à temperatura como é possível ver na Figura 11 (Hutchings; Shipway, 2017).

Figura 11 – Relação entre a temperatura e a viscosidade



Fonte: Adaptado de Peleg (2018).

Um alto índice de viscosidade no lubrificante é um requisito essencial para manter o filme adequado de lubrificante e fornecer lubrificação ao tribo-par nos diferentes ambientes de trabalho. Como o lubrificante precisa funcionar em diferentes temperaturas, o alto índice de viscosidade garante a estabilidade da viscosidade (Kurre; Yadav, 2023).

O índice de viscosidade pode ser calculado a partir da seguinte Equação (8):

$$IV = \frac{L - U}{L - H} * 100 \quad (8)$$

Onde U é a viscosidade cinemática medida a 40°C, L e H que correspondem à viscosidade a 100°C do óleo de interesse são lidos da tabela correspondente à norma ASTM D2270.

## 2.6 LUBRIFICAÇÃO

Um lubrificante funciona introduzindo entre as superfícies deslizantes uma camada de material com menor resistência ao cisalhamento do que qualquer uma das superfícies em si ou a interface. Em alguns sistemas lubrificados, o lubrificante pode não impedir completamente o contato por aspereza, embora o reduza e também possa reduzir as forças adesivas entre as superfícies. Em outros casos, o lubrificante separa completamente as superfícies. Assim, em

maior ou menor grau, o uso de um lubrificante sempre reduzirá a taxa de desgaste por deslizamento, e este é outro benefício substancial da lubrificação (Hirani, 2016).

O objetivo da lubrificação é formar uma película lubrificante que separe as superfícies de atrito e suporte uma carga com baixa tensão de cisalhamento, reduzindo o atrito e o desgaste dos materiais. Uma película lubrificante pode ser líquida, gasosa ou sólida (Hutchings; Shipway, 2017).

Os principais propósitos da lubrificação são: (i) reduzir o desgaste e prevenir a perda de calor resultante do contato das superfícies em movimento; (ii) proteger contra a corrosão e reduzir a oxidação; (iii) atuar como isolante em aplicações de transformadores; e (iv) atuar como agente selante contra sujeira, poeira e água (Singh *et al.*, 2017b).

### **2.6.1 Lubrificantes sólidos**

Um lubrificante sólido é basicamente qualquer material sólido que possua as duas propriedades a seguir: Capacidade de sustentar a carga aplicada sem deformação mensurável ou perda de material. Em outras palavras, a taxa de desgaste deve ser aceitavelmente baixa. O coeficiente de atrito deve ser razoavelmente baixo. Para isso, a resistência ao cisalhamento da interface formada deve ser menor do que a resistência ao cisalhamento dos sólidos em contato (Ouyang *et al.*, 2022).

Para Ouyang *et al.* (2022), as vantagens dos lubrificantes sólidos são: Lubrificantes sólidos são mais eficazes do que lubrificantes líquidos em altas cargas/pressões. Lubrificantes sólidos apresentam alta resistência à deterioração durante o armazenamento. São altamente estáveis em condições extremas de temperatura. Na ausência de bombas, tubulações, etc., os lubrificantes sólidos permitem que os equipamentos sejam mais leves e econômicos e além do anterior, os lubrificantes sólidos apresentam limpeza superior.

Uma maneira de aplicar lubrificante sólido é o revestimento em pó. Pode-se usar lubrificante sólido em pó e esfregá-lo contra a tribo-superfície. Uma camada de lubrificante se formará na tribo-superfície, mas pode não durar um longo período de tempo (Zouari *et al.*, 2014).

Para aumentar a durabilidade dos lubrificantes sólidos aplicados em superfícies, frequentemente são utilizados ligantes e pigmentos lubrificantes. A superfície deve estar limpa de contaminantes e ligeiramente rugosa para proporcionar maior área de aderência do lubrificante. Revestimentos colados proporcionam maior espessura de película, aumentando assim a vida útil (Zouari *et al.*, 2014).

Revestimentos compostos por um lubrificante sólido e um agente de resina aglutinante podem ser aplicados ao substrato por pulverização, imersão ou pincel. A imersão é um método mais barato. Resinas e agentes aglutinantes permanecem eficazes se a temperatura de operação for inferior a 250 °C. Para aplicações em temperaturas mais altas (> 300 °C), podem ser utilizados ligantes inorgânicos, como sais metálicos ou cerâmicas. Revestimentos curados ao ar são sensíveis à temperatura; portanto, revestimentos curados por calor, que toleram temperaturas mais altas, são utilizados como ligantes inorgânicos (Zouari *et al.*, 2014).

## **2.6.2 Lubrificante semissólido**

A graxa é uma massa pegajosa usada em diferentes sistemas mecânicos para fins de lubrificação. Graxas lubrificantes são óleos de baixa viscosidade espessados por meio de sólidos finamente dispersos chamados espessantes. A composição da graxa compreende óleos básicos (75-95%), aditivos (0-5%) e fibras espessantes minúsculas (5-20%) (Hutchings; Shipway, 2017).

Para o óleo base, a viscosidade do óleo (naftênico, parafínico, ROA, ésteres, silicones, glicóis, etc.) é selecionada com base na exigência de baixa/alta temperatura de operação. Óleos base de menor viscosidade são selecionados para sintetizar graxas de baixa temperatura, enquanto óleos base de maior viscosidade são escolhidos para sintetizar graxas de alta temperatura (Hutchings; Shipway, 2017).

Para os aditivos os produtos químicos são adicionados à graxa para melhorar seu desempenho e compatibilidade, além de melhorar a proteção ambiental. Lubrificantes sólidos, como grafite, MoS e aditivos EP (extrema pressão), melhoram o desempenho e a aplicação da graxa. A adição de grafite (graxa de grafite), PTFE (graxa de teflon) e MoS (graxa MOLY) reduz o atrito, aumentando a resistência da película adesiva para evitar o contato entre superfícies. Em outras palavras, esses aditivos proporcionam um efeito de amortecimento e mantêm as superfícies metálicas afastadas umas das outras. Sob cargas muito elevadas ou temperaturas de operação relativamente altas, aditivos de extrema pressão (compostos solúveis de enxofre, cloreto e fósforo) são misturados ao óleo (Stachowiak; Batchelor, 2025).

Para os espessantes, sejam estes, espessantes orgânicos (à base de sabão ou não) e inorgânicos (sem sabão) são utilizados na fabricação de graxas. A estrutura fibrosa proporcionada pelo sabão metálico determina a estabilidade mecânica e as propriedades físicas da graxa final. A graxa econômica mais comumente utilizada é a graxa à base de cal (cálcio)

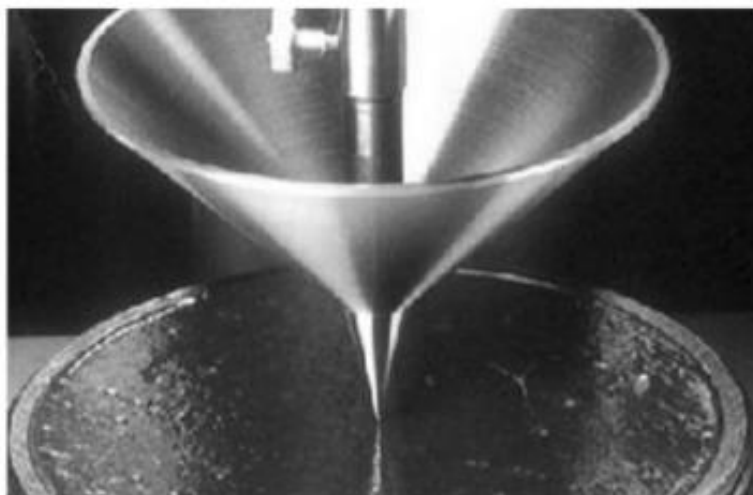
(temperatura máxima de 55 a 80 °C). A graxa à base de soda (sódio) (temperatura máxima de 90 a 120 °C) (Stachowiak; Batchelor, 2025).

O ponto de gota é crítico porque é o ponto em que a graxa retorna ao estado líquido (o óleo se separa do espessante). Em outras palavras, essa temperatura máxima é chamada de ponto de gota (Hutchings; Shipway, 2017).

Vantagens da graxa: Permanece no ponto de aplicação e adere à superfície; portanto, requer aplicações menos frequentes; essa característica torna a graxa muito útil para eixos inclinados/verticais. Veda contaminantes e reduz a necessidade de vedações mais caras. Resistente à água e reduz problemas de vapor de óleo. Prolonga a vida útil de peças desgastadas, aplainando irregularidades. Proporciona melhor amortecimento de lubrificação mecânica para condições extremas, como cargas de choque, operações de reversão, baixas velocidades e altas cargas. Reduz ruídos e vibrações (Stachowiak; Batchelor, 2025).

Uma das características importantes da graxa é a consistência NLGI (2025), definida como o Número de Consistência NLGI. A consistência é avaliada medindo-se a distância, em décimos de mm, até a qual um cone metálico padrão penetra na graxa sob uma carga padrão como ilustrado na Figura 12; o resultado é conhecido como penetração. Uma classificação de graxa amplamente utilizada é a do Instituto Nacional de Graxas Lubrificantes (NLGI) dos Estados Unidos. A Tabela 1 lista os números NLGI de graxas.

Figura 12 – Arranjo de cones para medir o número de consistência



Fonte: Adaptado de NLGI (2025).

Tabela 1 – Números de consistência NLGI

| Grau de consistência | Faixa de penetração trabalhada<br>(1/10 mm) |
|----------------------|---------------------------------------------|
| 000                  | 445-475                                     |
| 00                   | 400-430                                     |
| 0                    | 355-385                                     |
| 1                    | 310-340                                     |
| 2                    | 265-295                                     |
| 3                    | 220-250                                     |
| 4                    | 175-205                                     |
| 5                    | 130-160                                     |
| 6                    | 85-115                                      |

Fonte: Adaptado de NLGI (2025).

Para encontrar a consistência da graxa segundo a ASTM (2025), o seguinte método baseado na norma ASTM D217 pode ser usado: A superfície da graxa (mantida a 25 °C) é alisada para torná-la uniforme; o mecanismo de liberação do cone (Figura 12) é ativado e o cone é deixado afundar por 5 segundos. Com base na profundidade de penetração (conforme listada na Tabela 1), a consistência (em termos de grau NLGI) é definida. Por exemplo, se a profundidade de penetração do cone varia de 17,5 a 20,5 mm, a consistência da graxa é 4.

#### 2.6.2.1 Graxa à base de óleo de soja

O óleo de soja é o óleo vegetal mais amplamente utilizado em formulações de lubrificantes biodegradáveis e apresenta as vantagens de ser um recurso natural renovável e quase completamente biodegradável. A estrutura dos ácidos graxos de um óleo vegetal determina as propriedades de oxidação e lubrificação da graxa (Adhvaryu; Erhan; Perez, 2004b).

A química da estrutura do sabão de ácido graxo é responsável por certas características de desempenho da graxa, incluindo inibição de ferrugem/corrosão, atrito e resistência ao desgaste. Os componentes polares na graxa são ativos na superfície e, portanto, têm uma forte afinidade por superfícies metálicas, enquanto a cauda de hidrocarbonetos é direcionada para longe, resultando na prevenção do contato direto de oxigênio, água (agentes de ferrugem e corrosão) e partículas de poeira com as superfícies metálicas. Além disso, a camada de graxa

fortemente adsorvida no metal é altamente eficaz na redução do atrito metal-metal (Sharma *et al.*, 2005).

As propriedades lubrificantes da graxa à base de óleo de soja dependem em grande parte da consistência da graxa resultante da microestrutura do espessador de sabão. O aumento do comprimento da cadeia de ácidos graxos no sabão resulta em uma interação de ligação mais forte e, portanto, em uma matriz de graxa mais dura. Graxas relativamente mais macias têm uma melhor tendência de espalhamento e possibilidade de adesão ao metal e eliminam condições como lubrificação insuficiente (Adhvaryu; Erhan; Perez, 2004b).

### 2.6.3 Lubrificantes líquidos

De acordo com Tang *et al.* (2014), um lubrificante líquido é uma substância fluida utilizada para reduzir o atrito, o desgaste e a geração de calor entre superfícies sólidas em movimento relativo. Sua principal função é formar uma película lubrificante entre essas superfícies, evitando o contato direto entre elas, o que prolonga a vida útil dos componentes mecânicos.

Os lubrificantes líquidos mais comuns são os óleos padrões SAE (Society of Automotive Engineers) e API (American Petroleum Institute) são usados para classificar os óleos (Hutchings; Shipway, 2017).

#### 2.6.3.1 Óleo vegetal

Refere-se a um tipo de lubrificante derivado de fontes vegetais, como sementes, frutas ou nozes. Esses óleos são usados como lubrificantes em uma variedade de aplicações industriais e comerciais devido às suas propriedades de lubrificação e sua capacidade de reduzir o atrito e o desgaste entre superfícies móveis (Mobarak *et al.*, 2014).

Os óleos vegetais podem ser uma alternativa aos lubrificantes convencionais à base de petróleo devido à sua renovabilidade, biodegradabilidade e menor impacto ambiental. Além disso, alguns óleos vegetais, como o óleo de mamona, o óleo de soja e o óleo de girassol, possuem propriedades intrínsecas que os tornam adequados como lubrificantes em certas aplicações, oferecendo boa estabilidade térmica, resistência à oxidação e capacidades de carga (Mobarak *et al.*, 2014).

### 2.6.3.1.1 Óleo de rícino ou mamona (*Ricinus communis*)

O comércio de óleo de mamona como item de comércio remonta à antiguidade. O óleo é obtido pela extração ou expressão da semente de uma planta que tem o nome botânico *Ricinus communis* da família Euphorbiaceae. O óleo não é apenas um recurso natural, é barato e ecologicamente correto. O óleo de mamona é um óleo viscoso, amarelo-claro, não volátil e não secante, com um sabor suave e às vezes é usado como purgante (Ogunniyi, 2006).

Embora o óleo de mamona não seja comestível, ele é mais versátil do que outros óleos vegetais, sendo amplamente utilizado como matéria-prima para muitos produtos químicos industriais devido à sua estrutura única. É um dos óleos vegetais que encontrou aplicação em muitas indústrias químicas. É matéria-prima para tintas, revestimentos, tintas de impressão, lubrificantes e uma ampla variedade de outros produtos (Ogunniyi, 2006).

As propriedades físicas do óleo de mamona foram estudadas como mostrado na Tabela 2. A análise comparativa mostrou que os valores de viscosidade, densidade, condutividade térmica e ponto de fluidez do óleo de mamona foram maiores do que os valores de um lubrificante padrão (óleo de motor SAE 40) (Patel *et al.*, 2016).

Tabela 2 – Propriedades físicas do óleo de mamona

| Propriedade                    | Valor   |
|--------------------------------|---------|
| Viscosidade (cSt)              | 889,3   |
| Densidade (g/mL)               | 0,959   |
| Condutividade térmica (W/m °C) | 4.727   |
| Calor específico (kJ/kg K)     | 0,089   |
| Ponto de fulgor (°C)           | 145     |
| Ponto de fluidez (°C)          | 2,7     |
| Ponto de fusão (°C)            | -2 a -5 |
| Índice de refração (°C)        | 1.480   |

Fonte: Adaptado de Patel *et al.* (2016).

### 2.6.3.2 Gorduras animais

Esses óleos são extraídos de animais e peixes. São compostos de ácidos graxos e álcoois. São frequentemente chamados de óleos fixos porque não se volatilizam a menos que se decomponham, oxidam lentamente e possuem propriedades de extrema pressão. Devido a essas

propriedades, gorduras animais são adicionadas aos óleos minerais para melhorar a formação de película sob condições de alta carga e alta temperatura. Um dos principais problemas dessa classe de lubrificantes é a disponibilidade limitada (Banković-Ilić *et al.*, 2014).

#### 2.6.3.3 Óleos minerais

Óleos minerais são extraídos do petróleo bruto. O óleo mineral consiste em hidrocarbonetos (compostos por 83-87% de carbono e 11-14% de hidrogênio em peso) com aproximadamente 30 átomos de carbono em cada molécula (compostos por cadeias de carbono lineares e cíclicas ligadas entre si). Contém também enxofre, oxigênio e nitrogênio. É preferível uma porcentagem de enxofre entre 0,1% e 1,0% (Hutchings; Shipway, 2017).

Os óleos minerais são conhecidos por sua alta estabilidade química e resistência à oxidação, o que os torna úteis em lubrificantes, fluidos hidráulicos, óleos para transformadores, etc. (Mobarak *et al.*, 2014).

Os óleos minerais são classificados como parafínicos, naftênicos e aromáticos. Para lubrificação, os parafínicos são a escolha preferível em comparação aos naftênicos e aromáticos (Stachowiak; Batchelor, 2025).

##### 2.6.3.3.1 Óleos parafínicos

Esses óleos apresentam boa resistência natural à oxidação. No entanto, durante a oxidação, formam ácidos; ou seja, quando queimados, deixam um depósito carbonáceo duro. Algumas das características dos óleos parafínicos são: Boa estabilidade térmica; baixa volatilidade; alto índice de viscosidade ( $VI = 90-115$ ); alto ponto de fulgor e ponto de fluidez mais alto que o naftênico ou aromático (Masson *et al.*, 2006).

##### 2.6.3.3.2 Óleo parafínico PNL 30

O PNL30 é um óleo base mineral parafínico, sem aditivos em sua formulação original. Pode ser utilizado como base para a produção de lubrificantes ou graxas por meio da adição de aditivos funcionais. Sua composição é baseada em cadeias de hidrocarbonetos saturados, com estruturas que variam de 15 a 50 átomos de carbono, o que lhe confere altos pontos de ebulição (PETROBRAS, 2025).

Suas propriedades notáveis incluem boa resistência à oxidação, separação adequada de água (demulsibilidade) e comportamento viscoso estável. Fisicamente, varia de transparente a amarelo claro, é inodoro e apresenta boa estabilidade quando exposto a condições ambientais padrão de temperatura e pressão. Classificado como óleo do Grupo II, o PNL30 possui saturação superior a 90%, teor de enxofre inferior a 0,03% e índice de viscosidade entre 80 e 120 (PETROBRAS, 2025).

#### **2.6.3.3.3 Óleos naftênicos**

Os óleos naftênicos são um tipo de óleos minerais derivados do petróleo, caracterizados por uma alta proporção de hidrocarbonetos naftênicos (ou cicloalcanos), ou seja, moléculas em forma de anel saturado. Esses óleos possuem propriedades distintas em relação aos óleos parafínicos, que são compostos por cadeias lineares ou ramificadas. Algumas das características dos óleos naftênicos são: Menor IV (15-75); menos resistente à oxidação; pontos de fulgor mais baixos que os parafínicos; ponto de fluidez mais baixos que os parafínicos, portanto, bons para aplicações de baixa temperatura; quando queimados, depósitos macios são formados, portanto, o desgaste abrasivo é menor; e a oxidação leva a depósitos indesejáveis do tipo lodo (Masson *et al.*, 2006).

#### **2.6.3.3.4 Óleos aromáticos**

Os óleos aromáticos têm um índice de viscosidade muito baixo, o que os torna de uso bastante limitado. É preferível extrair os componentes dos óleos aromáticos durante o processo de refino do óleo mineral. Algumas das características dos óleos aromáticos são: Baixo índice de viscosidade (<50); alta densidade e alta volatilidade; baixo ponto de fluidez e baixa estabilidade à oxidação; e alta estabilidade térmica e altos teores de enxofre (Stratiev *et al.*, 2019).

#### **2.6.3.4 Óleos sintéticos**

Óleos sintéticos são utilizados em condições operacionais extremas, onde óleos convencionais não podem ser utilizados. Condições como temperatura ambiente inferior a -85 °C, velocidade de rotação superior a 60.000 rpm e temperatura superior a 260 °C não podem ser tratadas por óleos convencionais. Essas condições adversas exigem o uso de óleos sintéticos

projetados especificamente com moléculas de formato uniforme e cadeias de carbono mais curtas para resistir ao calor e ao estresse. Quase todos os motores a jato do mundo utilizam lubrificantes sintéticos. Os óleos sintéticos são mais caros em comparação com o óleo mineral; portanto, os óleos sintéticos são selecionados onde os óleos minerais são inadequados. Algumas das vantagens dos óleos sintéticos são: A viscosidade não varia tanto com a temperatura quanto no óleo mineral; a taxa de oxidação é muito mais lenta (Luna *et al.*, 2011).

Óleos sintéticos comuns são poliglicóis (polialquilenoglicol). Esses óleos podem absorver água e têm índice de viscosidade de 200. Esses óleos têm sido usados como fluidos de freio. Os poliglicóis oferecem vantagens distintas como lubrificantes para sistemas que operam em altas temperaturas, como correias transportadoras de fornos, onde o poliglicol queima sem deixar qualquer depósito de carbono e também é usado na indústria têxtil (Stratiev *et al.*, 2019).

Os ésteres são melhores que os óleos minerais na redução do atrito, na resistência à oxidação, no prolongamento do período de drenagem e na volatilidade. Seu custo é apenas um pouco maior que o dos óleos minerais. O óleo à base de silicone tem um índice de viscosidade de 300 bom para aplicações especiais é quimicamente inerte. Embora tenham baixa lubrificação de contorno, baixa solubilidade e alto custo de produção. O éter polialquílico perfluoro tem boa estabilidade térmica e de oxidação e um índice de viscosidade de 200; no vácuo pode ser usado para lubrificação de película fina (Stratiev *et al.*, 2019).

## 2.7 TÉCNICAS DE ANÁLISE DE LUBRIFICANTES

As partículas de desgaste são únicas, possuindo características individuais que evidenciam as condições em que foram formadas. Assim, o ensaio cuidadoso da morfologia e a determinação da composição das partículas de desgaste podem fornecer informações específicas sobre a condição das superfícies móveis dos elementos da máquina a partir dos quais foram produzidas, o mecanismo de sua formação e o modo de desgaste em operação no sistema do qual foram extraídas (Bowen *et al.*, 1976).

A ferrografia é uma técnica em uso desde 1970 uma técnica de monitoramento de condições altamente sensível, projetada especificamente para isolar e classificar partículas de desgaste e contaminantes presentes em lubrificantes industriais. Este método baseia-se na sedimentação magnética controlada, que permite que as partículas metálicas sejam separadas do fluido lubrificante e depositadas de forma ordenada em um substrato transparente. Um aspecto fundamental desta técnica é a sua capacidade de remover com eficiência impurezas não

magnéticas, como fuligem e outros resíduos carbonáceos, que podem interferir na análise visual e na interpretação morfológica do desgaste (Bowen *et al.*, 1976; Stachowiak; Batchelor, 2025).

A ferrografia permite que as partículas sejam observadas individualmente, classificando-as de acordo com seu tamanho e morfologia. Isso possibilita a identificação de mecanismos específicos de desgaste, como fadiga, abrasão, adesão ou corrosão. Esse arranjo sequencial evita que partículas maiores sejam ocultadas por acúmulos de detritos mais finos, o que melhora substancialmente a resolução do diagnóstico. Além disso, sua capacidade de detectar partículas maiores que 1 µm torna essa técnica uma ferramenta estratégica para o diagnóstico precoce, antes que os danos evoluam para falhas críticas da máquina (Bowen *et al.*, 1976).

### 2.7.1 Tribômetro Pin on Disk

Técnicas experimentais em tribologia são uma ferramenta fundamental para caracterizar o comportamento de materiais e lubrificantes sob condições de contato mecânico. Embora a medição de parâmetros como atrito e desgaste possa parecer relativamente acessível do ponto de vista metodológico, o verdadeiro desafio reside na interpretação crítica dos resultados. Essa interpretação deve considerar a complexidade dos mecanismos tribológicos envolvidos, bem como a transferência dos dados obtidos em laboratório para contextos operacionais da vida real, onde múltiplas variáveis, como carga, temperatura, regime de lubrificação e tipo de estresse mecânico, influenciam os resultados (Valdes *et al.*, 2020).

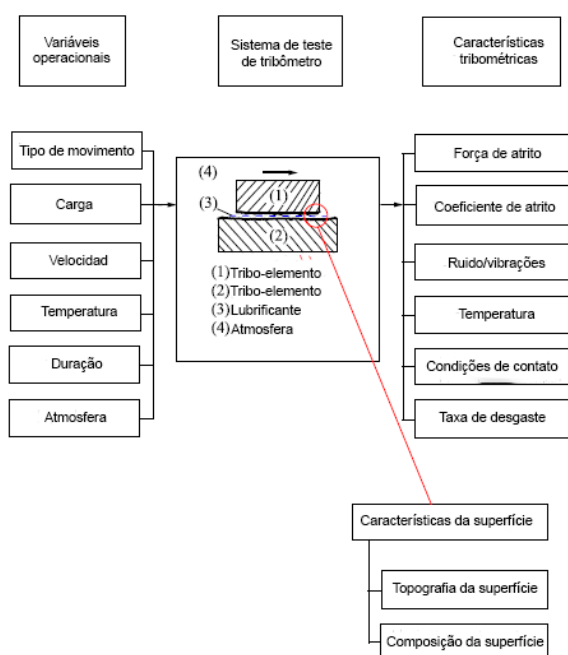
A tribologia abrange um campo amplo e multidisciplinar, abrangendo desde a quantificação de atrito e desgaste até a avaliação do desempenho de lubrificantes e componentes mecânicos sob estresse, passando pelo monitoramento das condições operacionais em máquinas industriais. Com um tribômetro adequado e configurado corretamente, é possível simular as principais variáveis que afetam os fenômenos tribológicos de forma controlada e reprodutível, permitindo o estudo preciso de situações críticas de contato, desgaste e lubrificação que ocorrem em aplicações reais (Valdes *et al.*, 2020).

No entanto, a seleção ou o projeto inadequado de um tribômetro podem levar a resultados errôneos ou não representativos. Portanto, um sólido conhecimento das especificações e do funcionamento deste equipamento é essencial para a realização de qualquer experimento tribológico. De acordo com a Sociedade de Tribologistas e Engenheiros de Lubrificação, reconhece-se uma ampla diversidade no projeto e na tecnologia de tribômetros, com um total de 234 configurações diferentes registradas atualmente (Valdes *et al.*, 2020).

De acordo com Valdes *et al.* (2020), o tribômetro tipo pino sobre disco é amplamente utilizado na área de tribologia devido à sua versatilidade. É utilizado em pesquisas relacionadas a rolamentos, sistemas de freio, aplicações de manufatura e sistemas ferroviários, entre outros. Seu princípio de funcionamento é baseado em um pino que, por meio de um braço carregado, exerce uma força normal na superfície de um disco rotativo. Os ensaios podem ser realizados em condições secas ou lubrificadas, dependendo dos requisitos do estudo.

A Figura 13 apresenta os principais parâmetros e características que devem ser considerados em um tribômetro, bem como a importância de se contar com equipamentos auxiliares complementares capazes de gerar movimentos em velocidades controladas, aplicar cargas específicas e reproduzir temperaturas que simulem fielmente mecanismos de desgaste reais. Esses sistemas auxiliares também devem ser capazes de fornecer lubrificantes ao ambiente de ensaios. Os tribômetros mais sofisticados integram sensores e instrumentos para medir o coeficiente e a força de atrito, taxas de desgaste, vibrações, ruído gerado durante o ensaio e temperatura do sistema (Valdes *et al.*, 2020).

Figura 13 – Características e parâmetros relevantes do tribômetro



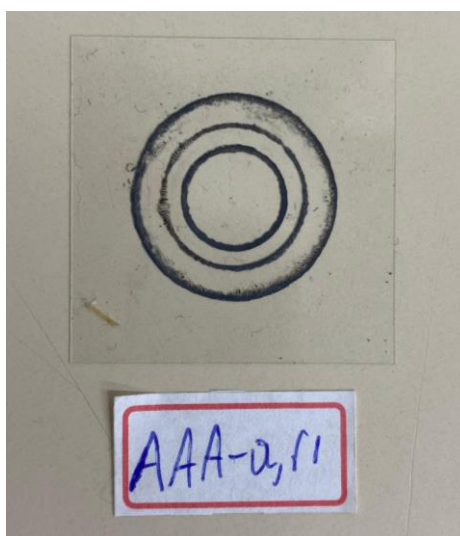
Fonte: Adaptado de Valdes *et al.*(2020).

### 2.7.2 Ferrografia analítica

A ferrografia analítica é uma metodologia qualitativa avançada utilizada para a identificação detalhada de partículas de desgaste em óleos usados. Seu princípio baseia-se na sedimentação magnética seletiva, o fluido lubrificante é direcionado ao longo de uma lâmina transparente colocada em um campo magnético não uniforme gerado por ímãs permanentes (Bhat; Bhapkar; Desai, 2022; Upadhyay, 2013).

De acordo com Tiwari *et al.* (2017), essa variação na intensidade do campo faz com que as partículas metálicas se distribuam ao longo do substrato de acordo com seu tamanho e suscetibilidade magnética. As partículas maiores e mais pesadas são depositadas em regiões de maior intensidade magnética, enquanto as menores migram para áreas de menor atração como ilustrado na Figura 14.

Figura 14 – Ferrograma



Fonte: Elaborado pelo autor.

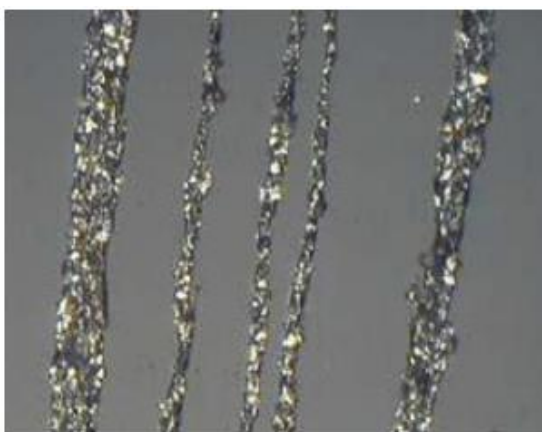
Esse padrão de deposição gradual permite a avaliação individualizada de cada partícula por meio de microscopia, facilitando a identificação de mecanismos de desgaste. A capacidade de observar a forma, a cor, a textura e o tamanho de partículas metálicas e não metálicas proporciona uma leitura direta do estado tribológico da máquina (Upadhyay, 2013).

### 2.7.2.1 Tipos de partículas de desgaste

#### 2.7.2.1.1 *Partículas de desgaste por atrito normal*

Partículas geradas como resultado do desgaste normal por atrito (Figura 15) em uma máquina normalmente se apresentam como pequenas plaquetas planas. Seu tamanho típico varia de 1 a 15 micrometros ou até menos Tiwari; Dubey, (2017). Essas partículas são caracterizadas por uma superfície praticamente lisa ou sem textura perceptível, e sua espessura raramente excede um micron.

Figura 15 – Partícula gerada por atrito

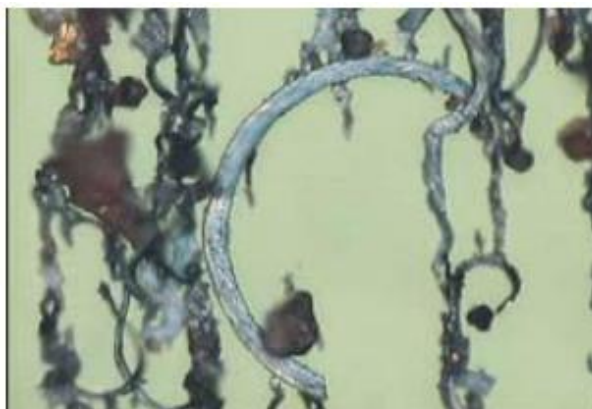


Fonte: Adaptado de Tiwari; Dubey (2017).

#### 2.7.2.1.2 *Partículas de desgaste de corte*

Esses tipos de partículas (Figura 16) se formam quando uma superfície penetra em outra, o que pode ocorrer de duas maneiras diferentes. Uma envolve o desalinhamento ou fratura de um componente relativamente duro, resultando no aparecimento de bordas afiadas capazes de se incorporar em superfícies mais macias, gerando partículas entre 5 e 100 micrometros de tamanho Tiwari; Dubey, (2017). Outra forma de geração ocorre na presença de contaminantes abrasivos, que podem dar origem a partículas extremamente finas, semelhantes a cavacos ou fios, com espessuras tão pequenas quanto 0,25 micrometros. Partículas de desgaste por cisalhamento são consideradas sinais anômalos. Quando detectadas em grandes quantidades, especialmente aquelas de grande comprimento (em torno de 50 micrometros), podem indicar uma possível falha iminente do componente envolvido.

Figura 16 – Partícula gerada por cisalhamento

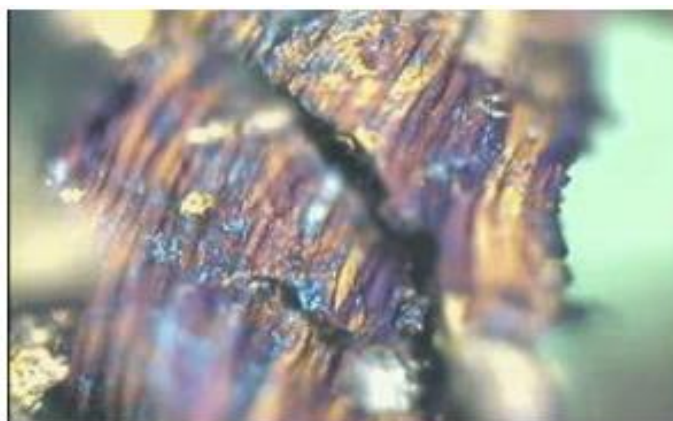


Fonte: Adaptado de Tiwari; Dubey (2017).

#### **2.7.2.1.3 Partículas de desgaste por deslizamento severo**

Essas partículas se distinguem pela presença de estrias paralelas em sua superfície (Figura 17), uma característica associada à alta tensão superficial. Sua formação está frequentemente associada a altas velocidades ou combinações de cargas, além da lubrificação deficiente dos componentes envolvidos. Geralmente, são maiores que 15 micrômetros Tiwari; Dubey, (2017).

Figura 17 – Partícula de desgaste por deslizamento severo



Fonte: Adaptado de Tiwari; Dubey (2017).

#### **2.7.2.1.4 Partículas de desgaste do rolamento**

Gerados como resultado da fadiga em rolamentos de elementos rolantes e buchas de mancais de deslizamento. Podem ser partículas de fadiga (Figura 18), bem como partículas de desgaste laminar.

Figura 18 – Partícula de desgaste do rolamento

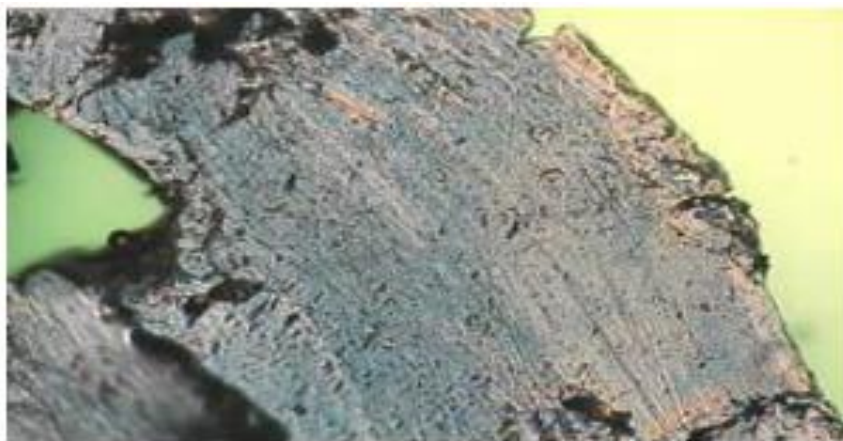


Fonte: Adaptado de Tiwari; Dubey (2017).

#### **2.7.2.1.5 Partículas de desgaste de engrenagens**

Esses tipos de partículas (Figura 19) podem se originar por dois mecanismos distintos. Partículas de fadiga originadas da linha de contato das engrenagens compartilham características semelhantes às geradas em rolamentos, geralmente apresentando uma superfície lisa e geometria irregular. As partículas mais espessas estão associadas a tensões de tração na superfície da engrenagem, onde trincas de fadiga avançam mais profundamente no dente antes que ocorra o descolamento do material. Em contraste, partículas associadas ao desgaste por escoriação surgem sob condições de carga ou velocidade excessivas e normalmente apresentam uma textura superficial áspera com contornos irregulares e irregulares.

Figura 19 – Partícula de desgaste de engrenagens

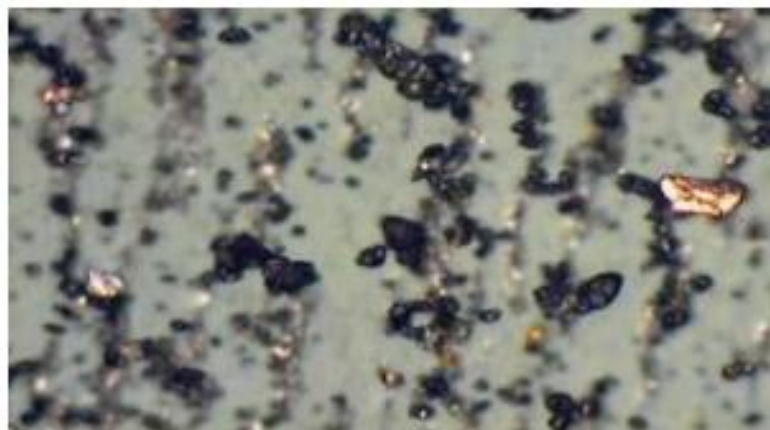


Fonte: Adaptado de Tiwari; Dubey (2017).

#### **2.7.2.1.6 Partículas de óxido preto**

As partículas estão associadas à lubrificação insuficiente entre as superfícies metálicas. As partículas (Figura 20) são formadas sob altas temperaturas como resultado do contato metal com metal.

Figura 20 – Partículas de óxido preto



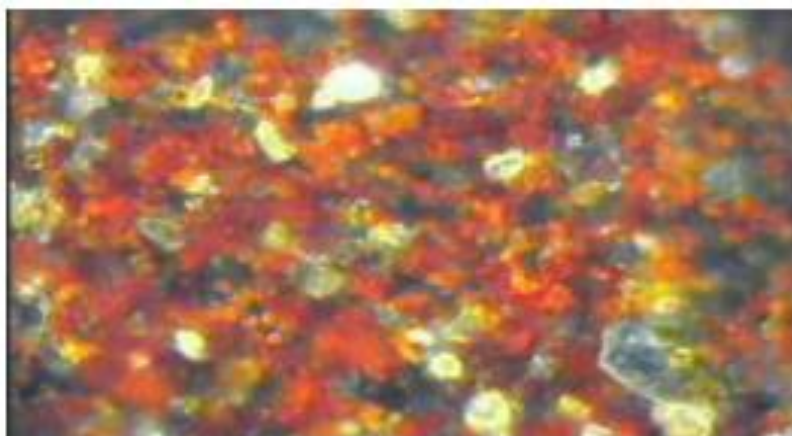
Fonte: Adaptado de Tiwari; Dubey (2017).

#### **2.7.2.1.7 Partículas de óxido vermelho**

A ferrugem é comumente referida como as partículas vermelhas (

Figura 21) que surgem como resultado de processos corrosivos, geralmente associados à presença de umidade ou contaminação por água no sistema de lubrificação. Essas partículas se formam quando o oxigênio reage com superfícies metálicas expostas, promovendo a oxidação do metal base. Sua presença em uma análise ferrográfica é indicativa de corrosão ativa e pode indicar deficiências na proteção contra a entrada de água ou na eficácia do aditivo inibidor de corrosão presente no lubrificante.

Figura 21 – Partícula de óxido vermelho



Fonte: Adaptado de Tiwari; Dubey (2017).

#### **2.7.2.1.8 Partículas de metais não ferrosos**

Frequentemente detectados em equipamentos por meio de análise ferrográfica, materiais como alumínio, ligas de cobre (Figura 22) e metais Babbitt podem ser identificados. Contaminantes como areia, sujeira, fibras e outros detritos também podem ser observados. A presença de partículas de areia ou sujeira geralmente se deve à contaminação externa do lubrificante, que pode ser proveniente de sistemas mal limpos, falhas em vedações, respiradores defeituosos, entre outros. As fibras, por outro lado, podem ser provenientes de filtros danificados ou deteriorados.

Figura 22 – Partículas de metais não ferrosos



Fonte: Adaptado de Tiwari; Dubey (2017).

### 2.7.3 Ferrografia quantitativa/Ferrografia de leitura direta

A ferrografia quantitativa, comumente conhecida como ferrografia de leitura direta (DR), é voltada para a análise numérica e estatística de partículas ferrosas suspensas em lubrificantes, priorizando a medição de sua concentração e distribuição de tamanho (Anderson; Hubert; Johnson, 1983).

Diferentemente da ferrografia analítica, que se concentra no estudo morfológico individual de cada partícula, a leitura direta utiliza sensores ópticos e campos magnéticos uniformes para quantificar o número de partículas grandes e pequenas presentes na amostra em tempo real (Levi; Eliaz, 2009).

O sistema determina dois valores: um relacionado a partículas maiores que  $5\ \mu\text{m}$  ( $L_p$ ) e outro a partículas mais finas e menores que  $5\ \mu\text{m}$  ( $S_p$ ), expressos como índices ferromagnéticos (Levi; Eliaz, 2009).

Esses dois índices podem ser usados para estimar um parâmetro importante na análise quantitativa: a concentração total de partículas de desgaste (WPC). Da mesma forma, a porcentagem de partículas grandes (PLP) pode ser estimada. A WPC é mostrada na Equação (9):

$$WPC = L_p + S_p \quad (9)$$

Onde ( $L_p$ ) é o número de partículas grandes e ( $S_p$ ) é o número de partículas pequenas.

Agora para o cálculo da porcentagem de partículas grandes pode-se estimar pela Equação (10):

$$PLP = \frac{L_p - S_p}{L_p + S_p} * 100 \quad (10)$$

Este tipo de análise não requer inspeção visual direta, tornando-o adequado para aplicações automatizadas e programas de manutenção preditiva, permitindo a detecção precoce de tendências anômalas de desgaste. No entanto, apresenta limitações na caracterização qualitativa de padrões de desgaste, pois não fornece informações sobre a morfologia ou composição das partículas. Portanto, é frequentemente utilizada como técnica complementar à ferrografia analítica em estudos de falhas mais complexos (Anderson; Hubert; Johnson, 1983).

#### **2.7.4 Filtragem por membrana**

A filtração por membrana é um método que envolve a passagem de uma amostra de lubrificante, previamente diluída com um solvente volátil, como pentano ou hexano, por um filtro de precisão com porosidade de aproximadamente 5 micrômetros ou menor. Esse procedimento permite a retenção de partículas sólidas cujo tamanho é igual ao limite superior do meio filtrante. Para otimizar o processo e reduzir o tempo de operação, uma bomba de vácuo que gera um diferencial de pressão é comumente utilizada como mostrado na Figura 23. Embora essa técnica não permita a classificação de partículas por tamanho, o que representa uma limitação para certas análises morfológicas e estatísticas, ela oferece a vantagem de capturar partículas ferrosas e não ferrosas, tornando-se uma alternativa prática, econômica e eficiente à triagem inicial de contaminantes em lubrificantes usados (Gohda, 2024).

Figura 23 – Filtragem por membrana por médio da bomba de vácuo



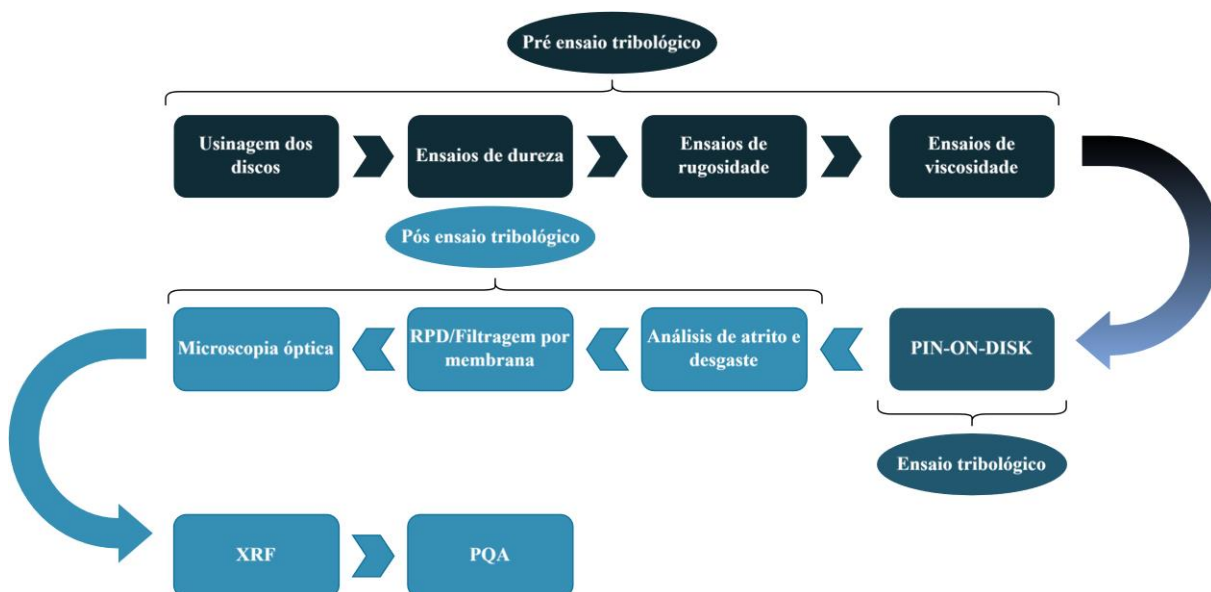
Fonte: Elaborada pelo autor.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Esta seção apresenta em detalhes os procedimentos experimentais utilizados para realizar a análise tribológica comparativa dos diversos agentes lubrificantes selecionados nesta pesquisa. A sequência metodológica está resumida no fluxograma apresentado na Figura 24, que fornece um fluxograma estruturado das etapas necessárias para atingir os objetivos propostos.

Todos os ensaios tribológicos foram realizados com equipamentos disponíveis no Laboratório de Tribologia – Laboratório de Análise de Partículas em Óleos Lubrificantes (LAPO), localizado no bloco M3 do Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia, Campus de Ilha Solteira – UNESP. Dentre os instrumentos utilizados, destaca-se o tribômetro do tipo Pin-on-Disk, baseado no projeto proposto por (Galvão, 2019), que permitiu avaliar o coeficiente de atrito e o desgaste específico de pares tribológicos sob diferentes condições de lubrificação.

Figura 24 – Fluxograma de metodologia



Fonte: Elaborado pelo autor.

Como pode ser observado no fluxograma apresentado, a metodologia foi estruturada em três etapas fundamentais: pré-ensaio tribológico, ensaio tribológico e pós-ensaio tribológico. Na primeira fase, os corpos de prova foram usinados, seguidos pela caracterização física e química dos lubrificantes e pela avaliação das propriedades relevantes dos pares metálicos selecionados.

A segunda etapa envolve a realização de ensaios tribológicos usando um tribômetro de pino sobre o disco, onde parâmetros chave como o coeficiente de atrito e a perda de massa relacionada ao desgaste foram registrados.

Por fim, na etapa de pós-ensaios, os dados coletados foram processados e interpretados, complementados pela análise ferrográfica das amostras de lubrificante, a fim de caracterizar morfologicamente as partículas de desgaste geradas durante o ensaio.

### 3.1 PRÉ-ENSAIOS TRIBOLÓGICOS

Nesta etapa inicial, os pares metálicos selecionados para os ensaios tribológicos são definidos e caracterizados. Os materiais dos discos utilizados foram ferro fundido nodular e bronze TM-23, ambos amplamente utilizados em componentes mecânicos submetidos a condições de contato deslizante, como rolamentos, buchas e superfícies de atrito em sistemas industriais.

A escolha desses materiais se baseia em sua alta disponibilidade no mercado brasileiro, seu uso frequente na indústria nacional; especialmente em setores como agricultura, ferrovias e geração de energia, e seu comportamento tribológico contrastante. Enquanto o ferro fundido se destaca por sua dureza, capacidade de amortecimento e resistência ao desgaste abrasivo, o bronze TM-23 é reconhecido por sua boa condutividade térmica e compatibilidade com materiais mais duros, o que reduz o risco de gripagem sob a divisa ou lubrificação insuficiente.

A Tabela 3 apresenta os parâmetros físico-mecânicos e Tabela 4 e Tabela 5 apresentam respectivamente, e a composição elementar de cada um desses materiais, essenciais para a compreensão do seu comportamento em condições de atrito e desgaste durante os ensaios.

Tabela 3 – Propriedades mecânicas dos discos

| Material     | Limite de resistência à tração (MPa) | Limite de escoamento (MPa) | Módulo de elasticidade (GPa) | Limite de fadiga (MPa) |
|--------------|--------------------------------------|----------------------------|------------------------------|------------------------|
| F.F. Nodular | 390                                  | 590                        | 155                          | 195                    |
| Bronze TM-23 | 221                                  | 108                        | 112                          | 110                    |

Fonte: Adaptado de da NBR (2015) e Rodrigues (1995).

Tabela 4 – Composição química do Ferro Fundido Nodular (% em peso)

| F.F. Nodular |       |      |      |      |      |      |      |
|--------------|-------|------|------|------|------|------|------|
|              | Fe    | C    | Mn   | Si   | P    | S    | Mg   |
| Mínimo       | 92,90 | 3,40 | –    | 2,10 | –    | –    | 0,04 |
| Máximo       | 94,10 | 3,80 | 0,30 | 2,80 | 0,09 | 0,02 | 0,06 |

Fonte: Adaptado de NBR (2015) e Rodrigues (1995).

Tabela 5 – Composição química do Bronze TM-23 (% em peso)

| Bronze TM-23 |      |       |      |
|--------------|------|-------|------|
| Cu           | Sn   | Pb    | Zn   |
| 70,00        | 4,00 | 20,00 | 9,00 |

Fonte Adaptado de NBR (2015) e Rodrigues (1995).

### 3.1.1 Usinagem dos discos

O processo de usinagem dos discos de ferro fundido nodular e bronze TM-23 foi realizado em um torno mecânico Nardini Mascote MS 205 (Figura 25), localizado no Bloco M1 do Departamento de Engenharia Mecânica do Campus de Ilha Solteira – UNESP.

Figura 25 – Torno usado para usinagem dos discos

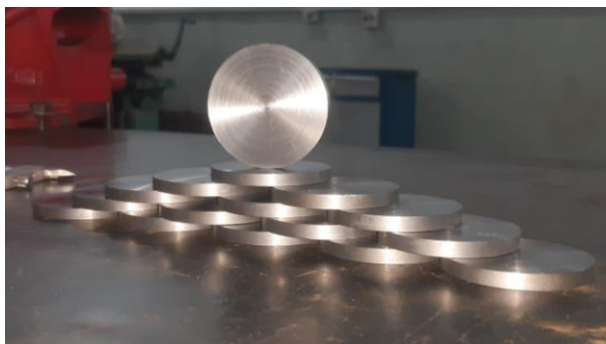


Fonte: Elaborado pelo autor.

O processo de torneamento teve como objetivo garantir as dimensões necessárias para a correta montagem no tribômetro Pin-on-Disk. As dimensões estabelecidas para os discos

foram 46,0 mm de diâmetro e 5,0 mm de espessura. A Figura 26 mostra o conjunto completo de discos de ferro fundido nodular fabricados e preparados para os ensaios experimentais.

Figura 26 – Discos usinados para os ensaios tribológicos



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.1.2 Ensaios de dureza

Como parte da metodologia estabelecida nos pré-ensaios tribológicos, foram realizados ensaios de dureza Vickers em discos pré-usinados de ferro fundido nodular e bronze TM-23. Para tanto, foi utilizado um durômetro Vickers (Figura 27). Este durômetro utiliza um indentador de diamante em formato quadrado para criar uma indentação na superfície do material.

Figura 27 – Durômetro Vickers



Fonte: Elaborado pelo autor.

A indentação resultante apresenta uma geometria romboidal, cujas diagonais devem ser medidas com precisão para calcular o valor de dureza. O procedimento foi realizado de acordo com os padrões estabelecidos, e a dureza foi determinada aplicando-se a seguinte Equação (11):

$$HV = 1,8544 \cdot \frac{Q}{d^2} \quad (11)$$

Onde  $Q$  é a carga aplicada em kgf e  $d$  é a média das diagonais da impressão em milímetros.

### 3.1.3 Ensaios de rugosidade

Como parte das atividades de ensaios pré-tribológicos, foram realizados ensaios de rugosidade superficial nos discos de ferro fundido nodular e bronze TM-23. Esta etapa foi fundamental para garantir que as superfícies de contato atendessem aos parâmetros de acabamento estabelecidos, necessários para a execução adequada dos ensaios no tribômetro Pin-on-Disk.

A Figura 28 mostra o equipamento utilizado para essas medições, o rugosímetro MITUTOYO modelo SJ-201P, que determinou a rugosidade média aritmética ( $R_a$ ), um parâmetro que representa a média dos desvios absolutos do perfil real da superfície em relação à linha média. Essa medição (que foi medida perpendicularmente à orientação da superfície), fornece uma indicação quantitativa das irregularidades da superfície, que podem influenciar diretamente os mecanismos de atrito e desgaste durante o contato tribológico.

Figura 28 – Rugosímetro MITUTOYO SJ-201P



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.1.4 Ensaios de viscosidade

Além das caracterizações físicas dos discos metálicos, foi essencial avaliar as propriedades reológicas dos óleos lubrificantes utilizados nesta pesquisa. Dois tipos de lubrificantes líquidos foram analisados: Um óleo mineral de referência, PNL-30, e um óleo vegetal extraído da mamona (*Ricinus communis*). Para garantir a reprodutibilidade e a confiabilidade estatística, cada amostra foi testada em seis réplicas independentes, cujos valores médios serão apresentados na Tabela 10. Para tanto, foram realizados ensaios de viscosidade cinemática a 40 °C e 100 °C, de acordo com as condições padrão estabelecidas por normas internacionais, como a ASTM D445.

As medições foram realizadas utilizando um viscosímetro Saybolt (Figura 29), um instrumento que determina o tempo que um determinado volume de fluido leva para passar por um orifício calibrado sob condições de temperatura controladas. Esses dados são essenciais para a compreensão do comportamento do lubrificante sob condições térmicas variáveis e sua capacidade de formar uma película lubrificante eficaz entre pares metálicos em movimento relativo.

Figura 29 – Viscosímetro Saybolt



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.1.5 Descrição da graxa vegetal à base de sabão de soja (LGQ04)

A amostra experimental identificada como LGQ04 consiste em uma graxa lubrificante biodegradável (bio-graxa) formulada a partir de uma base de óleo vegetal quimicamente

modificado. O fluido base foi obtido por meio da síntese de estolídeos e ésteres derivados do óleo de soja, um processo de modificação estrutural projetado para aumentar a estabilidade oxidativa e as propriedades viscosimétricas do triglicerídeo original. Essa tecnologia foi desenvolvida e está protegida pela patente (Antoniosi *et al.*, 2016).

Para a formulação da graxa, este fluido base sintético foi espessado com um sabão metálico de lítio, conferindo-lhe a consistência semissólida necessária para aplicações tribológicas. A validação funcional desta formulação específica, bem como a sua comparação tribológica com graxas minerais comerciais, já foram descritas anteriormente na literatura, nomeadamente a caracterização realizada por Slavec (2020), que confirmou a viabilidade técnica do LGQ04 como um biolubrificante de alto desempenho.

## 3.2 ENSAIO TRIBOLÓGICO

Esta seção descreve o principal ensaio tribológico realizado para avaliar o comportamento de atrito entre os pares metálicos lubrificados com os óleos selecionados. Para tanto, foi utilizado um tribômetro pino sobre disco, dispositivo amplamente utilizado em estudos de desgaste e atrito devido à sua capacidade de simular condições controladas de contato deslizante. O princípio de funcionamento do tribômetro é detalhado abaixo.

### 3.2.1 Ensaios no Pin on Disk

Para a avaliação tribológica dos pares metálicos e agentes lubrificantes selecionados, foi utilizada uma técnica de manutenção preditiva baseada na análise de lubrificantes. Os ensaios foram realizados utilizando um tribômetro pino sobre disco (Figura 30), desenvolvido por (Galvão, 2019), no Laboratório de Tribologia – Laboratório de Análise de Partículas em Óleos Lubrificantes (LAPO), localizado no Bloco M3 do Departamento de Engenharia Mecânica da UNESP, Campus de Ilha Solteira.

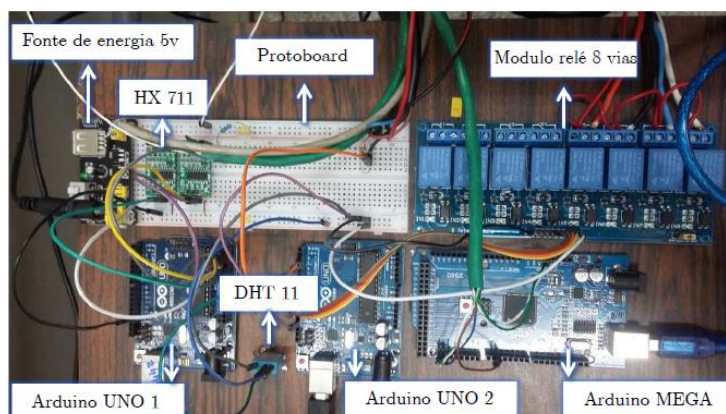
Figura 30 – Tribômetro tipo pino sobre disco



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 31 apresenta a arquitetura do sistema de instrumentação eletrônica implementado no tribômetro utilizado. Segundo Galvão (2019), este sistema foi desenvolvido com foco em baixo custo e alta acessibilidade, utilizando uma plataforma de hardware de código aberto baseada em Arduino como base de controle.

Figura 31 – Componentes eletrônicos para aquisição de dados



Fonte: Adaptado de Galvão (2019).

Um microcontrolador Arduino UNO foi utilizado para acionar e controlar o equipamento, juntamente com um conversor de frequência WEG CFW-08 para regular a velocidade do motor. O sistema também inclui um sensor infravermelho reflexivo E18-D80NK para detecção de movimento, um disjuntor de proteção e um módulo de relé de 8 canais (5 V), dos quais apenas quatro foram utilizados (Galvão, 2019).

Para a aquisição de dados de força, tanto normal quanto de atrito, foram integradas duas células de carga, conectadas a módulos amplificadores HX711, controlados por um segundo Arduino UNO. Para a medição de vibrações mecânicas durante os ensaios, um acelerômetro MPU6050 foi acoplado a um Arduino MEGA, responsável por registrar e transmitir os sinais correspondentes (Galvão, 2019).

### 3.2.2 Variáveis operacionais para os ensaios

Para realizar ensaios tribológicos nos pares metálicos previamente selecionados, foram utilizados quatro tipos de agentes lubrificantes, consistindo em dois óleos lubrificantes e duas graxas lubrificantes. Para garantir a formação eficaz do filme lubrificante, foram definidas velocidades de rotação específicas para cada tipo de lubrificante, levando em consideração seu comportamento reológico e sua capacidade de manter uma separação eficaz entre as superfícies em contato. Essa estratégia buscou minimizar tanto o coeficiente de atrito quanto a taxa de desgaste.

A Tabela 6 resume os parâmetros operacionais estabelecidos para os ensaios, incluindo os valores de carga aplicada, velocidade de deslizamento, distância percorrida, bem como o volume ou massa de lubrificante utilizado em cada configuração experimental.

Tabela 6 – Parâmetros operacionais do tribômetro

| Parâmetro                 | Valor |
|---------------------------|-------|
| Distancia [km]            | 20    |
| Rotação 1 [rpm]           | 330   |
| Rotação 2 [rpm]           | 240   |
| Carga 1 [kg]              | 5     |
| Carga 2 [kg]              | 7     |
| Óleo lubrificante [mL]    | 15    |
| Graxa lubrificante [g]    | 4     |
| Temperatura ambiente [°C] | 22-24 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Foram realizados um total de 64 ensaios tribológicos, combinando diferentes condições normais de carga e velocidade de deslizamento apresentados na Tabela 6, para replicar regimes operacionais representativos de aplicações industriais reais.

Para facilitar a identificação sistemática de cada ensaio, foi adotada uma nomenclatura codificada da forma e exemplo "**BAA-a,r1**", cuja estrutura é detalhada a seguir:

A primeira letra indica o tipo de agente lubrificante:

- **A** para graxa lubrificante
- **B** para óleo lubrificante

A segunda letra representa a origem do lubrificante:

- **A** para lubrificantes minerais
- **B** para lubrificantes vegetais

A terceira letra corresponde à combinação da velocidade de rotação e da carga aplicada:

- **A**: 330 rpm e 5 kg
- **B**: 330 rpm e 7 kg
- **C**: 240 rpm e 5 kg
- **D**: 240 rpm e 7 kg

A letra minúscula após o hífen identifica o material do disco:

- **a** para ferro fundido nodular
- **b** para bronze TM-23

Por fim, o sufixo r1 ou r2 indica a condição da superfície do disco em termos de rugosidade:

- **r1** para rugosidade tipo 1
- **r2** para rugosidade tipo 2

Este sistema de codificação permitiu um gerenciamento claro, reproduzível e organizado das condições de ensaio durante toda a pesquisa. Para maior clareza, apresenta-se na Tabela 7.

Tabela 7 – Nomenclatura usada para os ensaios no Pin on Disk

| Nomenclatura | Rotação [rpm] | Carga [kg] |
|--------------|---------------|------------|
| AAA-a,r1     | 330           | 5          |
| AAB-a,r1     | 330           | 7          |
| AAC-a,r1     | 240           | 5          |
| AAD-a,r1     | 240           | 7          |
| ABA-a,r1     | 330           | 5          |
| ABB-a,r1     | 330           | 7          |

| Nomenclatura | Rotação [rpm] | Carga [kg] |
|--------------|---------------|------------|
| ABC-a,r1     | 240           | 5          |
| ABD-a,r1     | 240           | 7          |
| BAA-a,r1     | 330           | 5          |
| BAB-a,r1     | 330           | 7          |
| BAC-a,r1     | 240           | 5          |
| BAD-a,r1     | 240           | 7          |
| BBA-a,r1     | 330           | 5          |
| BBB-a,r1     | 330           | 7          |
| BBC-a,r1     | 240           | 5          |
| BBD-a,r1     | 240           | 7          |
| BAA-a,r2     | 330           | 5          |
| BAB-a,r2     | 330           | 7          |
| BAC-a,r2     | 240           | 5          |
| BAD-a,r2     | 240           | 7          |
| BBA-a,r2     | 330           | 5          |
| BBB-a,r2     | 330           | 7          |
| BBC-a,r2     | 240           | 5          |
| BBD-a,r2     | 240           | 7          |
| AAA-b,r1     | 330           | 5          |
| AAB-b,r1     | 330           | 7          |
| AAC-b,r1     | 240           | 5          |
| AAD-b,r1     | 240           | 7          |
| ABA-b,r1     | 330           | 5          |
| ABB-b,r1     | 330           | 7          |
| ABC-b,r1     | 240           | 5          |
| ABD-b,r1     | 240           | 7          |
| BAA-b,r1     | 330           | 5          |
| BAB-b,r1     | 330           | 7          |
| BAC-b,r1     | 240           | 5          |
| BAD-b,r1     | 240           | 7          |
| BBA-b,r1     | 330           | 5          |
| BBB-b,r1     | 330           | 7          |

| Nomenclatura | Rotação [rpm] | Carga [kg] |
|--------------|---------------|------------|
| BBC-b,r1     | 240           | 5          |
| BBD-b,r1     | 240           | 7          |
| AAA-b,r2     | 330           | 5          |
| AAB-b,r2     | 330           | 7          |
| AAC-b,r2     | 240           | 5          |
| AAD-b,r2     | 240           | 7          |
| ABA-b,r2     | 330           | 5          |
| ABB-b,r2     | 330           | 7          |
| ABC-b,r2     | 240           | 5          |
| ABD-b,r2     | 240           | 7          |
| BAA-b,r2     | 330           | 5          |
| BAB-b,r2     | 330           | 7          |
| BAC-b,r2     | 240           | 5          |
| BAD-b,r2     | 240           | 7          |
| BBA-b,r2     | 330           | 5          |
| BBB-b,r2     | 330           | 7          |
| BBC-b,r2     | 240           | 5          |
| BBD-b,r2     | 240           | 7          |

Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.3 PÓS-ENSAIOS TRIBOLÓGICOS

Esta etapa envolve a análise dos dados obtidos após a realização dos ensaios tribológicos por médio da ferrografia analítica e DX. Com base nos resultados registrados, o comportamento tribológico dos pares metálicos foi avaliado, considerando tanto os valores da força de atrito quanto as respectivas taxas de desgaste.

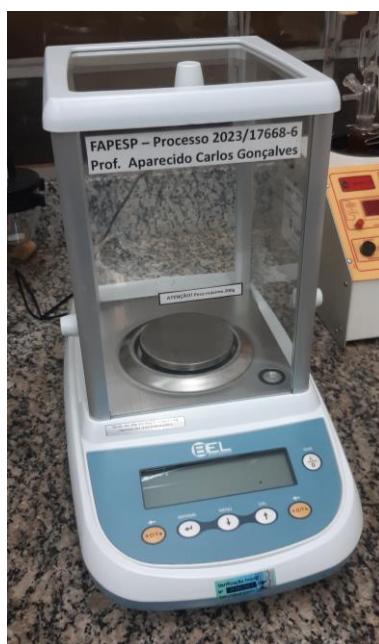
Além disso, amostras de óleo da interação entre o pino e o disco foram coletadas e analisadas para identificar a presença de partículas de desgaste, alterações físico-químicas no lubrificante e outros indicadores relevantes que permitam compreender os mecanismos de degradação envolvidos durante o contato tribológico.

### 3.3.1 Análise de atrito e desgaste

A análise da força de atrito foi realizada utilizando dados adquiridos por meio de uma célula de carga conectada a um sistema de aquisição baseado em Arduino UNO. O software MATLAB®, versão R2024b, foi utilizado para processar e analisar esses dados. Este software permitiu o cálculo do coeficiente de atrito médio para cada ensaio e gerou gráficos de comportamento dinâmico ao longo do tempo, fornecendo uma visão detalhada da evolução do contato tribológico durante cada condição operacional.

Em relação à avaliação do desgaste, a taxa de perda de massa foi determinada pela pesagem direta dos discos antes e depois dos ensaios. Para tanto, foi utilizada uma balança analítica de alta precisão, modelo BEL M214Ai (Figura 32), com resolução de 0,0001 g, garantindo a quantificação precisa do material removido devido ao processo de desgaste.

Figura 32 – Balança analítica de alta precisão



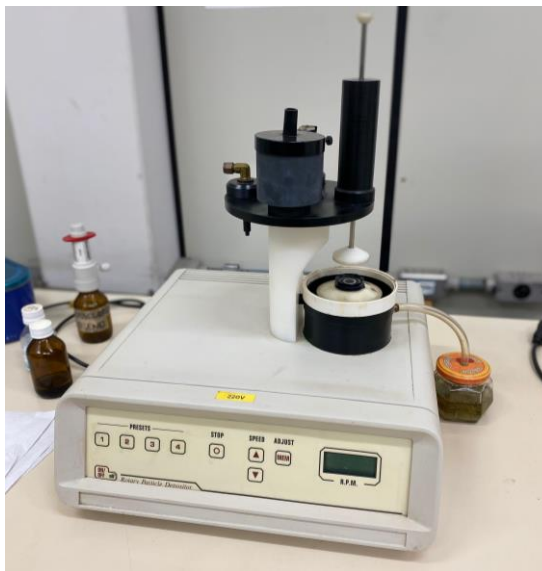
Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.3.2 Separador rotativo de partículas (RPD)

O Separador Rotativo de Partículas (Figura 33) é um dispositivo utilizado em análises de lubrificantes e estudos tribológicos, destinado a separar e classificar partículas sólidas presentes em fluidos industriais. Essas partículas, comumente associadas ao desgaste de componentes ou a fontes externas de contaminação, são indicadores-chave do estado

operacional de um sistema mecânico. A detecção e a análise adequadas permitem a implementação de estratégias eficazes de manutenção preditiva e a avaliação da gravidade dos mecanismos de desgaste.

Figura 33 – Separador rotativo de partículas



Fonte: Elaborado pelo autor.

O RPD utiliza um processo de separação centrífuga assistida magneticamente que aproveita a diferença de densidade entre as partículas e o fluido lubrificante. Girando em altas velocidades, o equipamento gera uma força centrífuga que impulsiona as partículas sólidas em direção às paredes internas da câmara rotativa. As partículas ferrosas, devido à sua suscetibilidade magnética, também são influenciadas por um campo magnético aplicado, o que melhora sua eficiência de captura. Dessa forma, o RPD permite a extração eficiente e seletiva de partículas, facilitando sua posterior análise morfológica e composicional por meio de técnicas complementares, como ferrografia ou espectroscopia.

#### 3.3.2.1 Filtragem por membrana celulósica

A filtração por membrana celulósica foi utilizada para tratar amostras com baixa concentração de partículas ferrosas, com o objetivo de separar e, posteriormente, analisar as impurezas sólidas contidas no lubrificante. Este método, amplamente utilizado na análise de fluidos industriais, permite a identificação e o dimensionamento eficazes de partículas contaminantes. Neste estudo, a técnica foi aplicada especificamente para avaliar a interação

entre o lubrificante e os subprodutos do desgaste, tornando-se uma ferramenta fundamental para o monitoramento do estado tribológico de componentes mecânicos.

Para a realização desta técnica, amostras com baixa concentração de partículas ferrosas foram selecionadas e diluídas utilizando hexano como solvente, isso para ser mais exato, foi aplicado às amostras de lubrificante que foram colocadas com o par bronze-aço. A filtração foi realizada utilizando membranas de celulose com porosidade de 1  $\mu\text{m}$ , adequadas para reter as partículas sólidas de interesse como ilustrado na Figura 34.

Figura 34 – Partículas filtradas na membrana celulosa



Fonte: Elaborado pelo autor.

As soluções resultantes (lubrificante + hexano) foram transferidas para béqueres de vidro e submetidas ao processo de filtração. Observou-se que as amostras com maior carga de partículas sólidas apresentaram maior tempo de filtração em comparação àquelas com partículas menores ou concentrações mais baixas.

Após a evaporação completa do hexano, as membranas com as partículas retidas foram submetidas à análise microscópica, seguindo o mesmo procedimento de observação utilizado na técnica do Separador Rotativo de Partículas (RPD).

### 3.3.3 Espectroscopia de raios-X (XRF)

A análise foi realizada utilizando um espectrômetro de fluorescência de raios X Oxford X-Supreme (Figura 35). Este instrumento permite a identificação qualitativa e quantitativa dos elementos químicos presentes nas partículas contidas nas amostras de lubrificantes, por meio da refração e absorção diferenciais dos raios X emitidos. Sua configuração permite a detecção de até 18 elementos químicos da tabela periódica, proporcionando uma caracterização precisa da composição elementar.

Figura 35 – Espectrômetro de raios-X



Fonte: Elaborado pelo autor.

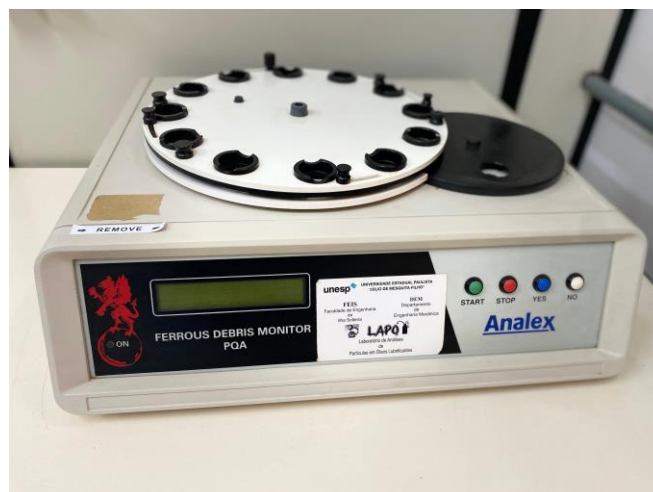
Graças à sua alta sensibilidade, o espectrômetro pode determinar não apenas a presença de elementos, mas também sua concentração em partes por milhão (ppm), o que é essencial para estudar mecanismos de desgaste, contaminação por metais e degradação de lubrificantes. Essas informações são cruciais para a detecção precoce de falhas mecânicas e para o desenvolvimento de estratégias de manutenção preditiva mais eficientes.

Para realizar a análise, amostras foram cuidadosamente preparadas. Cada amostra foi previamente agitada para garantir a homogeneidade dos dois sólidos em suspensão, e 15 mL de volume por amostra foram reservados para leitura. Este procedimento garante a precisão analítica e evita possíveis interferências na medição dos elementos.

### 3.3.4 Contador analítico de partículas ferrosas (PQA)

O Monitor Automático de Partículas Ferrosas, também conhecido como Contador Analítico de Partículas (PQA) (Figura 36), é um instrumento projetado para avaliar a concentração relativa de partículas metálicas magnéticas em amostras de óleo lubrificante. Seu princípio de funcionamento baseia-se na aplicação de um campo magnético induzido, que detecta a presença de materiais ferromagnéticos e expressa essa informação por meio de um parâmetro denominado índice PQ. Esse valor está diretamente correlacionado com a quantidade e o tamanho das partículas magnéticas presentes, sendo capaz de identificar até mesmo partículas geradas por desgaste normal, com dimensões próximas a 1 mm.

Figura 36 – Contador analítico de partículas ferrosas



Fonte: Elaborado pelo autor.

O sistema opera com duas bobinas termicamente balanceadas, uma atuando como sensor e a outra como referência eletrônica. Quando uma amostra de óleo contendo partículas ferrosas é introduzida no sensor, ocorre um desequilíbrio indutivo entre as duas bobinas. Esse desequilíbrio gera um sinal elétrico proporcional à massa total das partículas magnéticas, que é processado e reportado como o índice PQ.

Antes de iniciar a análise, o equipamento deve ser configurado e calibrado para garantir a confiabilidade e a estabilidade das medições. Este procedimento é realizado utilizando um padrão PQ predefinido (PQ 750), que serve como ponto de referência para o ajuste do instrumento. Após a calibração, as amostras são preparadas, para garantir a dispersão adequada das partículas sedimentadas. Em seguida, 2 mL de lubrificante são extraídos com uma pipeta e colocados em um recipiente plástico projetado para a análise como é mostrado na Figura 37.

Figura 37 – Amostras para o PQA: a) F.F. nodular e b) bronze TM-23



Fonte: Elaborado pelo autor.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta e analisa os resultados obtidos ao longo das diversas etapas experimentais desta pesquisa. Inicialmente, são apresentados os dados provenientes dos ensaios físico-mecânicos aplicados aos pares metálicos selecionados, incluindo os ensaios de dureza Vickers e rugosidade, essenciais para a caracterização da condição inicial dos discos antes de sua avaliação tribológica.

Paralelamente, são apresentados os resultados de viscosidade cinemática para os óleos lubrificantes testados, bem como os principais parâmetros técnicos considerados para as graxas lubrificantes, com o objetivo de contextualizar seu comportamento nas condições operacionais impostas.

Os resultados obtidos nos ensaios tribológicos realizados com o tribômetro Pin-on-Disk são então detalhados, com ênfase na análise do coeficiente de atrito e da taxa de desgaste registrada nos pares metálicos. Por fim, são discutidos os resultados obtidos na análise das amostras de lubrificantes pós-ensaio, utilizando técnicas como ferrografia direta, ferrografia analítica e outros métodos complementares, contribuindo para uma compreensão mais aprofundada dos mecanismos de desgaste envolvidos.

### 4.1 ENSAIOS FÍSICO-MECÂNICOS

Conforme descrito nas seções 3.1.2 e 3.1.3, os pares metálicos selecionados para este estudo foram submetidos aos ensaios de dureza Vickers e rugosidade, cujos resultados estão resumidos nas Tabela 8 e Tabela 9, respectivamente.

Tabela 8 – Dureza Vickers dos discos e pino

| Material       | Dureza Vickers [kg/mm <sup>2</sup> ] |
|----------------|--------------------------------------|
| F.F. nodular   | 190                                  |
| Bronze TM-23   | 56                                   |
| Aço AISI 52100 | 633                                  |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Em termos de dureza, o ferro fundido nodular apresentou um valor de 190 HV, enquanto o bronze TM-23 apresentou uma dureza consideravelmente menor, de 56 HV. Essa diferença reflete a natureza mais frágil e rígida do ferro fundido em comparação com a ductilidade do

bronze, o que pode influenciar diretamente o mecanismo de desgaste dominante durante o contato tribológico.

O pino de aço AISI 52100 obteve dureza de 633 HV, atendendo aos requisitos estabelecidos pela norma ASTM G99 para materiais utilizados em ensaios de pino sobre disco. Essa alta dureza garante um comportamento estável do pino durante o ensaio, minimizando o desgaste em relação aos discos e favorecendo a concentração do desgaste nos materiais testados.

Por outro lado, a rugosidade média aritmética ( $R_a$ ) é apresentada na Tabela 9, onde dois níveis de rugosidade foram distinguidos para cada um dos discos metálicos. Essa diferenciação intencional permitiu avaliar como a condição superficial inicial do substrato pode influenciar a formação do filme lubrificante e os mecanismos de desgaste envolvidos, especialmente sob diferentes condições de carga e velocidade. Essa variação na rugosidade fornece uma base comparativa para a análise do desempenho tribológico em cenários mais representativos da prática industrial.

Tabela 9 – Rugosidades dos discos

| Material     | Rugosidade 1 [ $\mu m$ ] | Rugosidade 2 [ $\mu m$ ] |
|--------------|--------------------------|--------------------------|
| F.F. nodular | 0,57                     | 0,72                     |
| Bronze TM-23 | 0,60                     | 0,69                     |

Fonte: Elaborado pelo autor.

## 4.2 ENSAIO DE VISCOSIDADE

Esta seção apresenta os resultados obtidos com o viscosímetro Saybolt, utilizado para determinar a viscosidade cinemática dos óleos lubrificantes selecionados para este estudo, cujos valores médios são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Viscosidade dos óleos

| Óleo lubrificante | Origem  | Base        | Viscosidade cinemática 40°C | Viscosidade cinemática 100°C | Índice de viscosidade |
|-------------------|---------|-------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------|
|                   |         |             | cSt                         | cSt                          |                       |
| Mamona            | Vegetal | Ácido graxo | 192,8                       | 21,47                        | 144,26                |
| PNL-30            | Mineral | Parafínico  | 28,94                       | 6,15                         | 186,18                |

Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com os resultados, o óleo mineral PNL-30 apresentou uma viscosidade cinemática de 28,94 cSt a 40 °C e 6,15 cSt a 100 °C, com um índice de viscosidade (IV) de 186,18. Em contraste, o óleo de mamona apresentou valores significativamente maiores: 192,8 cSt a 40 °C e 21,47 cSt a 100 °C, resultando em um índice de viscosidade de 144,26.

#### 4.2.1 Propriedades das graxas

Para a caracterização das graxas utilizadas nos ensaios tribológicos, foram considerados os dados relatados por (Slavec, 2020), referentes tanto à graxa mineral branca à base de cálcio quanto à graxa à base de óleo de soja. As propriedades relevantes para esta pesquisa estão resumidas na Tabela 11.

Tabela 11 – Propriedades das graxas

| Graxa  | Composição                            | Ponto de gota [°C] | Penetração trabalhada [1/10 mm] | Grado NLGI |
|--------|---------------------------------------|--------------------|---------------------------------|------------|
| LGQ04  | Óleo de soja à base de lítio (10%)    | 144                | 263                             | 3          |
| Branca | Óleo mineral à base de cálcio (8-10%) | 105                | 295                             | 2          |

Fonte: Adaptado de Slavec (2020).

De acordo com os valores apresentados, a graxa mineral branca apresenta ponto de gota de 105 °C, penetração trabalhada de 295 e grau NLGI 2, o que a classifica como uma graxa de consistência intermediária, adequada para aplicações gerais, mas com estabilidade térmica limitada. Por outro lado, a graxa vegetal à base de óleo de soja apresentou ponto de gota mais elevado, de 144 °C, e penetração trabalhada de 263, o que, juntamente com seu grau NLGI 3, indica uma graxa de maior consistência e melhor resistência a altas temperaturas.

#### 4.3 ENSAIO TRIBOLÓGICO

Os resultados consolidados dos ensaios realizados nas condições operacionais estabelecidas são apresentados na Tabela 12, incluindo os valores obtidos para o coeficiente de atrito e perda de massa associada ao desgaste dos pares metálicos sob diferentes regimes de carga, velocidade, tipo de lubrificante e rugosidade.

Tabela 12 – Parâmetros operacionais do tribômetro

| Nomenclatura | Velocidade<br>[rpm] | Carga<br>[kg] | Peso<br>antes [g] | Peso<br>depois<br>[g] | Desgaste<br>[g] | Tipo    | Cof. de<br>atrito |
|--------------|---------------------|---------------|-------------------|-----------------------|-----------------|---------|-------------------|
| AAA-a,r1     | 330                 | 5             | 60.7400           | 60.6681               | 0.0719          | Mineral | 0.1596            |
| AAB-a,r1     | 330                 | 7             | 60.6681           | 57.7062               | 2.9619          | Mineral | 0.1140            |
| AAC-a,r1     | 240                 | 5             | 60.7205           | 60.6492               | 0.0713          | Mineral | 0.0195            |
| AAD-a,r1     | 240                 | 7             | 60.6492           | 59.3247               | 1.3245          | Mineral | 0.0139            |
| ABA-a,r1     | 330                 | 5             | 61.6035           | 61.5950               | 0.0085          | LGQ04   | 0.0203            |
| ABB-a,r1     | 330                 | 7             | 61.5950           | 58.6003               | 2.9947          | LGQ04   | 0.0148            |
| ABC-a,r1     | 240                 | 5             | 62.1280           | 62.1264               | 0.0016          | LGQ04   | 0.0492            |
| ABD-a,r1     | 240                 | 7             | 62.1264           | 61.1180               | 1.0084          | LGQ04   | 0.1266            |
| BAA-a,r1     | 330                 | 5             | 55.0604           | 55.0560               | 0.0044          | PNL-30  | 0.0239            |
| BAB-a,r1     | 330                 | 7             | 55.6459           | 55.6233               | 0.0226          | PNL-30  | 0.1119            |
| BAC-a,r1     | 240                 | 5             | 59.6760           | 59.6659               | 0.0101          | PNL-30  | 0.1194            |
| BAD-a,r1     | 240                 | 7             | 59.6659           | 59.6058               | 0.0601          | PNL-30  | 0.1308            |
| BBA-a,r1     | 330                 | 5             | 61.2920           | 61.1970               | 0.0950          | Mamona  | 0.0829            |
| BBB-a,r1     | 330                 | 7             | 61.1970           | 60.0662               | 1.1308          | Mamona  | 0.0887            |
| BBC-a,r1     | 240                 | 5             | 56.4916           | 56.4684               | 0.0232          | Mamona  | 0.0687            |
| BBD-a,r1     | 240                 | 7             | 56.4684           | 56.4129               | 0.0555          | Mamona  | 0.0160            |
| BAA-a,r2     | 330                 | 5             | 60.4775           | 60.4754               | 0.0021          | PNL-30  | 0.0185            |
| BAB-a,r2     | 330                 | 7             | 60.4754           | 60.4535               | 0.0219          | PNL-30  | 0.0149            |
| BAC-a,r2     | 240                 | 5             | 59.8320           | 59.8253               | 0.0067          | PNL-30  | 0.0218            |
| BAD-a,r2     | 240                 | 7             | 59.8253           | 59.7804               | 0.0449          | PNL-30  | 0.0145            |
| BBA-a,r2     | 330                 | 5             | 59.7150           | 59.7116               | 0.0034          | Mamona  | 0.0201            |
| BBB-a,r2     | 330                 | 7             | 59.7116           | 59.7040               | 0.0076          | Mamona  | 0.0738            |
| BBC-a,r2     | 240                 | 5             | 59.6550           | 59.6382               | 0.0168          | Mamona  | 0.0639            |

| Nomenclatura | Velocidade<br>[rpm] | Carga<br>[kg] | Peso<br>antes [g] | Peso<br>depois<br>[g] | Desgaste<br>[g] | Tipo    | Cof. de<br>atrito |
|--------------|---------------------|---------------|-------------------|-----------------------|-----------------|---------|-------------------|
| BBD-a,r2     | 240                 | 7             | 59.6382           | 59.6200               | 0.0182          | Mamona  | 0.0751            |
| AAA-b,r1     | 330                 | 5             | 76.8105           | 76.7850               | 0.0255          | Mineral | 0.1245            |
| AAB-b,r1     | 330                 | 7             | 76.7850           | 76.7433               | 0.0417          | Mineral | 0.1268            |
| AAC-b,r1     | 240                 | 5             | 74.5570           | 74.5327               | 0.0243          | Mineral | 0.0832            |
| AAD-b,r1     | 240                 | 7             | 74.5327           | 74.5025               | 0.0302          | Mineral | 0.0170            |
| ABA-b,r1     | 330                 | 5             | 74.1853           | 74.1177               | 0.0676          | LGQ04   | 0.0905            |
| ABB-b,r1     | 330                 | 7             | 74.1177           | 73.1930               | 0.9247          | LGQ04   | 0.1231            |
| ABC-b,r1     | 240                 | 5             | 75.4593           | 75.1768               | 0.2825          | LGQ04   | 0.0894            |
| ABD-b,r1     | 240                 | 7             | 75.1768           | 74.3639               | 0.8129          | LGQ04   | 0.1266            |
| BAA-b,r1     | 330                 | 5             | 75.0382           | 74.9926               | 0.0456          | PNL-30  | 0.0952            |
| BAB-b,r1     | 330                 | 7             | 74.9926           | 74.9063               | 0.0137          | PNL-30  | 0.1069            |
| BAC-b,r1     | 240                 | 5             | 74.9200           | 75.4576               | 0.0351          | PNL-30  | 0.0892            |
| BAD-b,r1     | 240                 | 7             | 75.4927           | 75.3620               | 0.0956          | PNL-30  | 0.0387            |
| BBA-b,r1     | 330                 | 5             | 75.4576           | 75.0758               | 0.0467          | Mamona  | 0.0270            |
| BBB-b,r1     | 330                 | 7             | 75.1225           | 73.5131               | 1.2597          | Mamona  | 0.0808            |
| BBC-b,r1     | 240                 | 5             | 74.7728           | 72.7075               | 0.0104          | Mamona  | 0.0696            |
| BBD-b,r1     | 240                 | 7             | 75.7075           | 72.6711               | 0.0364          | Mamona  | 0.0727            |
| AAA-b,r2     | 330                 | 5             | 74.3615           | 74.3492               | 0.0123          | Mineral | 0.1169            |
| AAB-b,r2     | 330                 | 7             | 74.3492           | 74.2839               | 0.0653          | Mineral | 0.0591            |
| AAC-b,r2     | 240                 | 5             | 75.4341           | 75.4191               | 0.0150          | Mineral | 0.0669            |
| AAD-b,r2     | 240                 | 7             | 75.4191           | 75.3782               | 0.0409          | Mineral | 0.0937            |
| ABA-b,r2     | 330                 | 5             | 74.3946           | 74.3027               | 0.0919          | LGQ04   | 0.0455            |
| ABB-b,r2     | 330                 | 7             | 74.3027           | 73.6611               | 0.6416          | LGQ04   | 0.0334            |
| ABC-b,r2     | 240                 | 5             | 74.6493           | 73.4081               | 0.2412          | LGQ04   | 0.0897            |
| ABD-b,r2     | 240                 | 7             | 73.4081           | 72.8702               | 0.5379          | LGQ04   | 0.0159            |
| BAA-b,r2     | 330                 | 5             | 74.0698           | 75.0530               | 0.0168          | PNL-30  | 0.0921            |
| BAB-b,r2     | 330                 | 7             | 74.0530           | 73.9439               | 0.1091          | PNL-30  | 0.0997            |
| BAC-b,r2     | 240                 | 5             | 77.6608           | 77.6337               | 0.0271          | PNL-30  | 0.0859            |
| BAD-b,r2     | 240                 | 7             | 77.6337           | 77.3418               | 0.2919          | PNL-30  | 0.0212            |
| BBA-b,r2     | 330                 | 5             | 75.1903           | 75.1879               | 0.0024          | Mamona  | 0.0537            |
| BBB-b,r2     | 330                 | 7             | 75.1879           | 74.0836               | 1.1043          | Mamona  | 0.1219            |
| BBC-b,r2     | 240                 | 5             | 77.0901           | 77.0884               | 0.0017          | Mamona  | 0.0728            |
| BBD-b,r2     | 240                 | 7             | 77.0884           | 77.0587               | 0.0297          | Mamona  | 0.0766            |

Fonte: Elaborado pelo autor.

### 4.3.1 Análise do coeficiente de atrito ( $\mu$ )

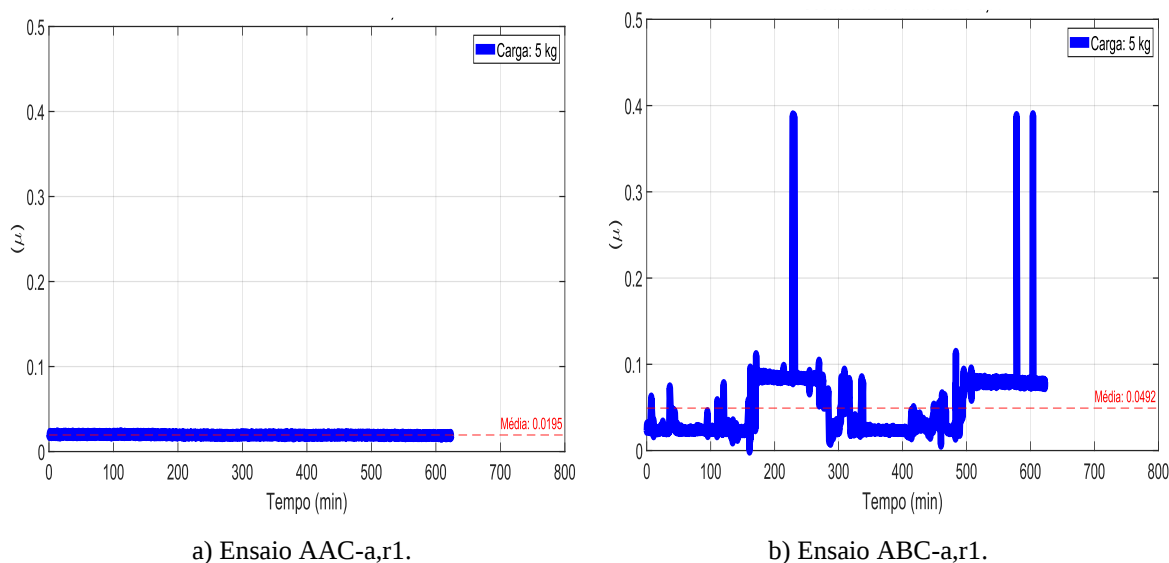
Para avaliar a eficiência tribológica dos lubrificantes selecionados, são apresentados a seguir gráficos correspondentes ao coeficiente de atrito (CoF) registrado durante os ensaios. Esses dados permitem interpretar a capacidade de cada lubrificante em reduzir a resistência ao deslizamento entre pares metálicos.

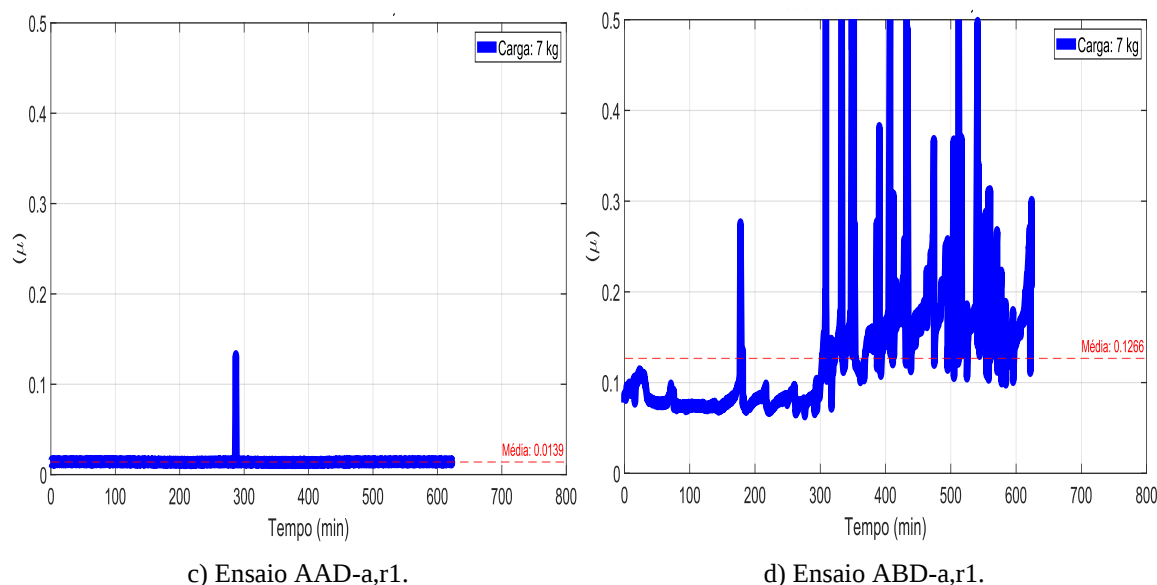
A análise é organizada sequencialmente, iniciando com os resultados obtidos para discos de ferro fundido nodular com rugosidade tipo 1, combinados com lubrificantes minerais e vegetais. Em seguida, são apresentados os resultados para bronze com rugosidade tipo 1 e, por fim, com rugosidade tipo 2.

#### 4.3.1.1 Coeficiente de atrito em F.F. nodular com a graxa como lubrificante e rugosidade 1

Para esta análise, serão considerados os valores mínimos e máximos de desgaste obtidos em cada série de oito ensaios (AAA-a,r1 a ABD-a,r1), conforme apresentado na Tabela 12. Cada série corresponde a uma combinação específica de material do disco, rugosidade e tipo de lubrificante (mineral ou vegetal). Esta estratégia analítica permite abordar um dos objetivos fundamentais desta pesquisa, comparar a eficiência tribológica de biolubrificantes e lubrificantes minerais, avaliando a sua capacidade de minimizar o desgaste e o CoF em condições operacionais equivalentes. Os primeiros gráficos com a graxa usada para a análise são ilustrados na Figura 38.

Figura 38 – Comportamento do CoF em F.F.N. com a graxa e rugosidade 1





Fonte: Elaborado pelo autor.

A análise da Figura 38 revela uma disparidade tribológica marcante dependendo da base do lubrificante. Sob uma carga de 5 kg (itens a e b), a graxa mineral manteve um regime estável com um coeficiente de atrito de 0,0195, enquanto a formulação da graxa de soja apresentou maior resistência ao deslizamento (COF 0,0492). Quando a carga foi aumentada para 7 kg (itens c e d), a graxa mineral otimizou seu desempenho, reduzindo seu atrito para 0,0139, o que contrasta fortemente com a degradação funcional da graxa de soja, cujo COF subiu para 0,1266.

Esse aumento acentuado no atrito do biolubrificante sugere uma ruptura do filme lubrificante induzida por instabilidade termo-oxidativa sob carga crítica, um mecanismo de falha em bases vegetais de soja descrito por Adhvaryu; Erhan e Perez (2004a,2004b), resultando em um contato mais áspero do que na referência mineral.

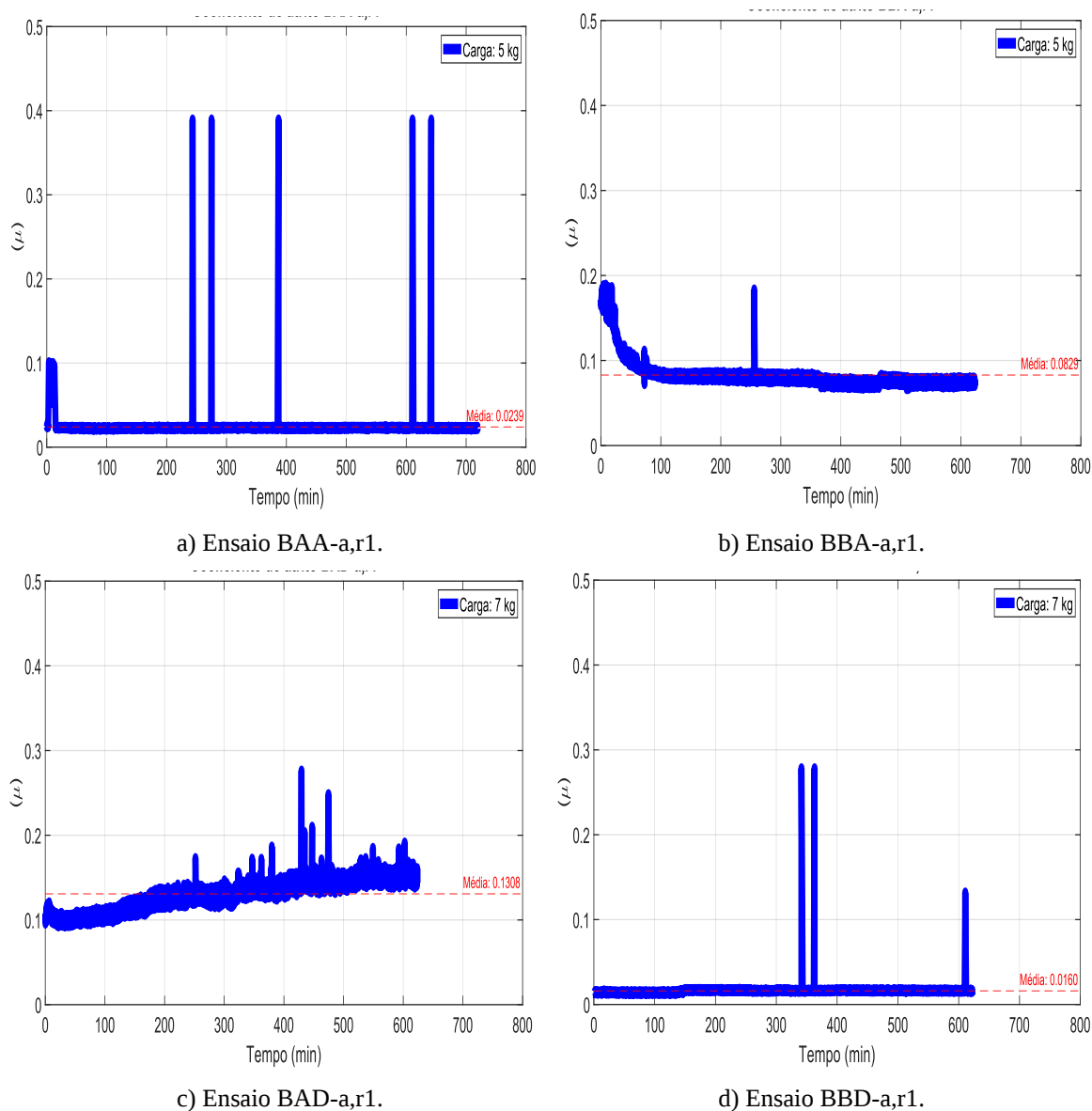
#### 4.3.1.2 Coeficiente de atrito em F.F. nodular com o óleo como lubrificante e rugosidade 1

Nesta segunda série de ensaios, A Figura 39 (itens a e b) mostra a evolução do CoF sob uma carga de 5 kg e uma velocidade de 330 rpm. O óleo mineral (a) apresentou um regime estável com um CoF médio de 0,0239, mostrando apenas perturbações ocasionais associadas à interação das asperezas da superfície. Em contraste, o ensaio com óleo de mamona (b) iniciou-se com um período de "amaciamento" caracterizado por altos valores de atrito antes de atingir a estabilização, resultando em um CoF médio mais elevado de 0,0829.

Esse comportamento diferencial, em que o óleo vegetal apresentou maior resistência ao movimento, pode ser atribuído à alta viscosidade natural do óleo de mamona. Conforme

discutido por Singh *et al.* (2020) em ensaios de pino sobre disco, embora os óleos vegetais possuam excelentes propriedades de superfície, em velocidades moderadas a altas eles podem induzir maior atrito viscoso (arrasto) na zona de contato hidrodinâmico em comparação com óleos minerais de menor massa molecular, o que explica o maior coeficiente de atrito observado nessa etapa específica.

Figura 39 – Comportamento do CoF em F.F.N. com o óleo e rugosidade 1



Fonte: Elaborado pelo autor.

O aumento da severidade do contato para 7 kg e a redução da velocidade para 240 rpm (itens c e d) resultaram em uma mudança drástica no desempenho tribológico. O filme de óleo mineral (c) mostrou-se incapaz de suportar o aumento da carga, evidenciado por um aumento

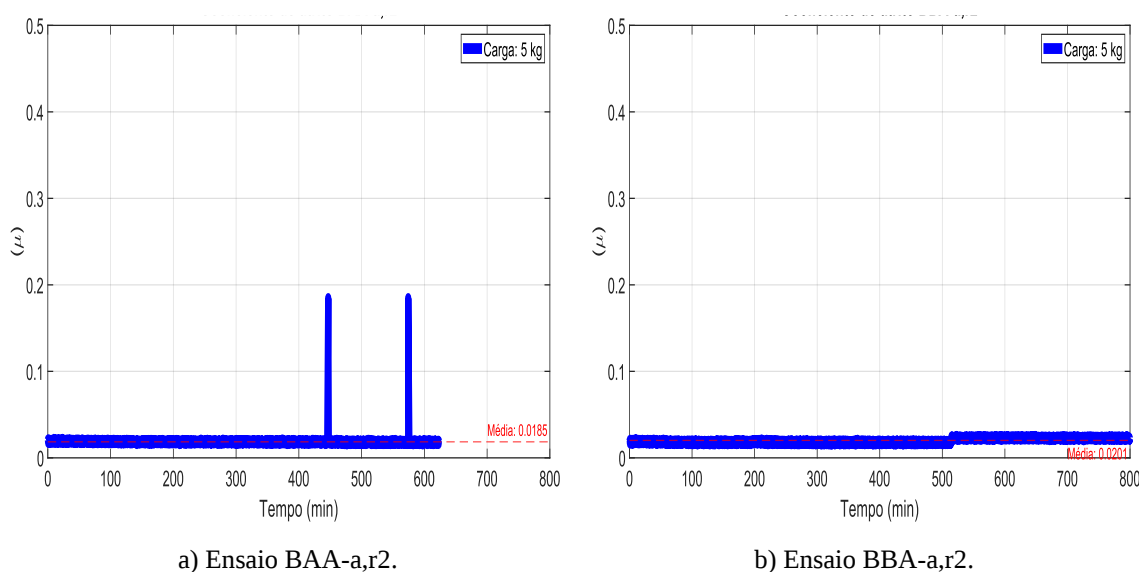
progressivo no CoF de 0,1308, indicativo de ruptura do filme lubrificante e contato metal-metal. Em contraste, o óleo de mamona (d) manteve uma estabilidade notável, registrando um CoF mínimo de 0,0160.

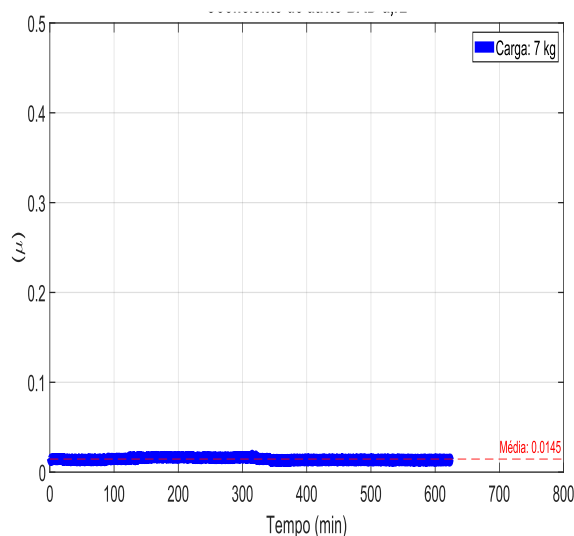
Este desempenho superior sob carga baseia-se na estrutura química única do óleo de mamona, descrita por Ahmed *et al.* (2025); Hamnas e Panicker (2025). A presença do ácido ricinoleico e seu grupo funcional hidroxila (-OH) confere ao lubrificante alta polaridade, facilitando uma forte adsorção física na superfície metálica. Essa camada protetora é capaz de suportar pressões de contato mais elevadas sem se romper, prevenindo o desgaste adesivo experimentado pelo par lubrificado com óleo mineral, um fenômeno corroborado em estudos tribométricos semelhantes (Kumar Kurre *et al.*, 2023).

#### 4.3.1.3 Coeficiente de atrito em F.F. nodular com o óleo como lubrificante e rugosidade 2

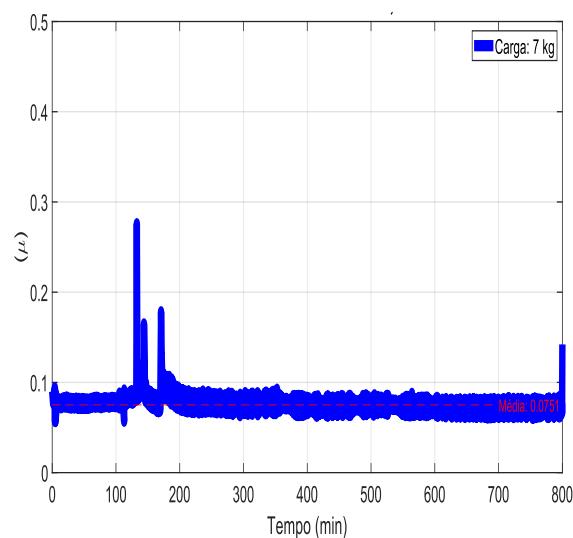
A análise da Figura 40 revela uma clara superioridade do óleo mineral em termos de estabilidade da película lubrificante nas condições avaliadas. Enquanto o fluido mineral manteve um regime constante de baixo atrito, reduzindo seu coeficiente de atrito de 0,0185 (a 5 kg) para 0,0145 (a 7 kg) e demonstrando eficiente adaptação hidrodinâmica sob carga, o óleo de mamona apresentou uma tendência oposta de degradação funcional. Apesar do desempenho inicial comparável (0,0201), o aumento da carga para 7 kg desestabilizou severamente a película biolubrificante, elevando seu coeficiente de atrito médio para 0,0751 com flutuações críticas.

Figura 40 – Comportamento do CoF em F.F.N. com o óleo e rugosidade 2





c) Ensaio BAD-a,r2.



d) Ensaio BBD-a,r2.

Fonte: Elaborado pelo autor.

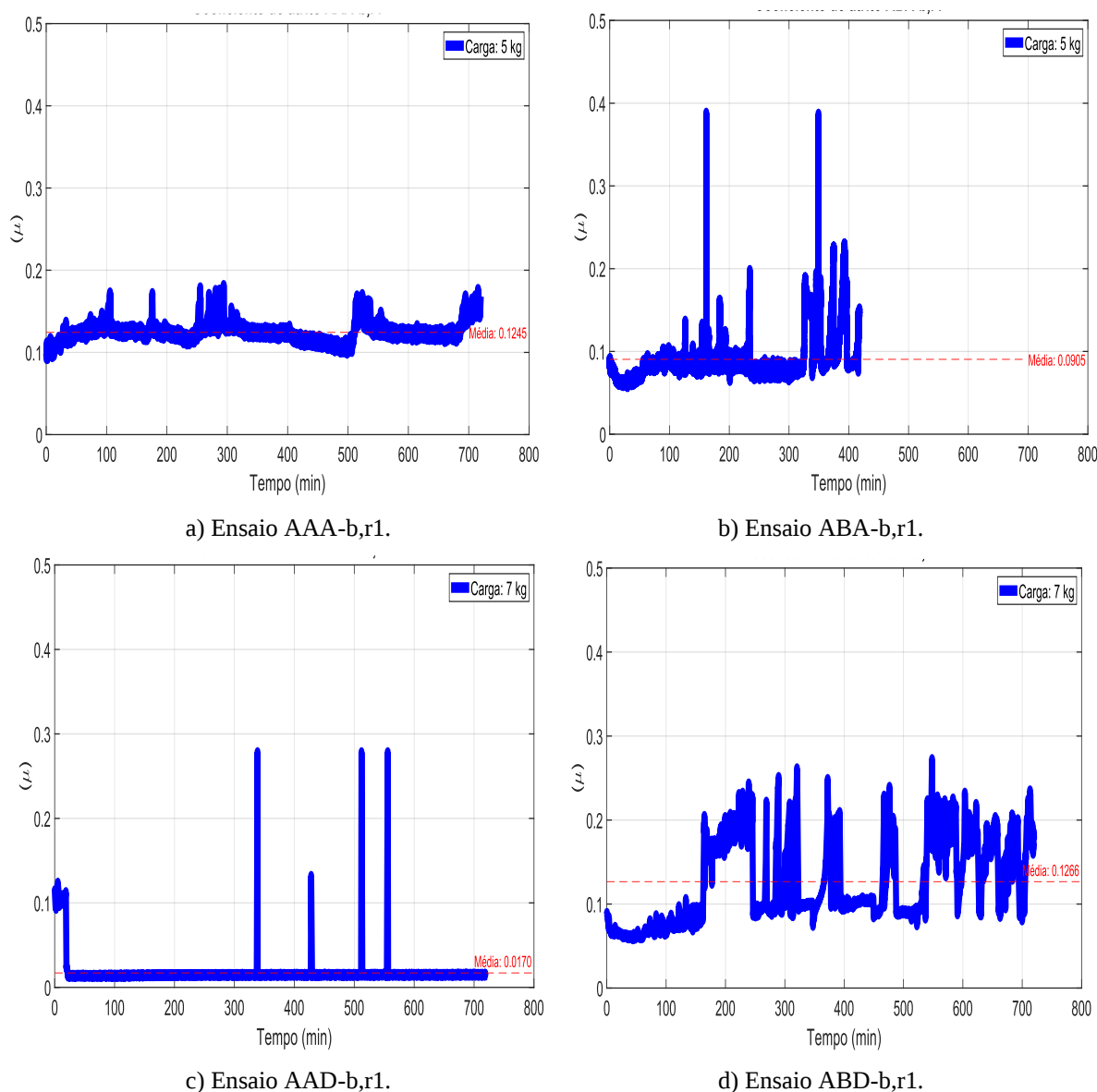
Esse comportamento errático e os picos de atrito observados no óleo vegetal sugerem a ocorrência de ruptura da película e fenômenos de contato intermitente (stick-slip), atribuíveis à incapacidade do fluido viscoso de repor a zona de contato na velocidade necessária (falta de fluido), uma limitação reológica em sistemas pino-disco documentada por (Kumar Kurre *et al.*, 2023).

#### 4.3.1.4 Coeficiente de atrito em Bronze TM-23 com a graxa como lubrificante e rugosidade

1

Nesta seção, a avaliação tribológica em discos de bronze (Figura 41) revelou uma inversão do comportamento de atrito dependendo da severidade do contato. Na primeira etapa (a e b), a graxa de soja apresentou superioridade funcional com um coeficiente de atrito de 0,0905 em comparação com 0,1245 para a graxa mineral, uma vantagem atribuível à capacidade dos ácidos graxos de formar monocamadas adsorvidas de alta densidade em superfícies metálicas (Adhvaryu; Erhan; Perez, 2004a).

Figura 41 – Comportamento do CoF em bronze TM-23 com a graxa e rugosidade 1



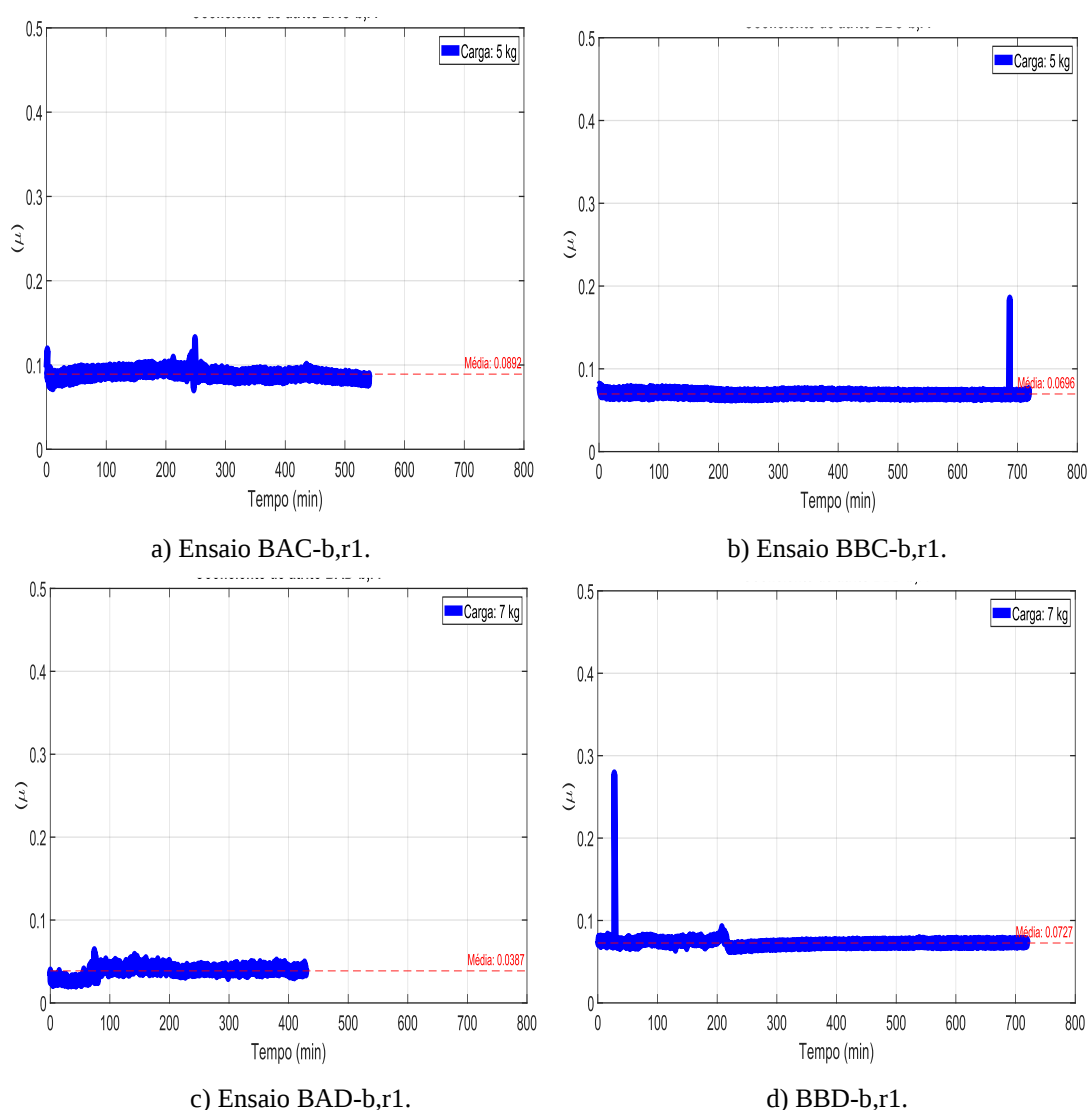
Fonte: Elaborado pelo autor.

No entanto, quando a carga foi aumentada para 7 kg e a velocidade para 240 rpm (c e d), a graxa mineral conseguiu estabilizar um regime hidrodinâmico eficiente (COF 0,0170), enquanto o biolubrificante sofreu degradação crítica, registrando comportamento caótico e um alto COF de 0,1266. Essa instabilidade sob maior cisalhamento sugere a ruptura da película limite por processos oxidativos, uma limitação estrutural das bases vegetais documentada por (Adhvaryu; Erhan; Perez, 2004b).

#### 4.3.1.5 Coeficiente de atrito em Bronze TM-23 com o óleo como lubrificante e rugosidade 1

A avaliação tribológica em substratos de bronze TM-23 (Figura 42) revela uma transição de regime governada pela natureza físico-química dos lubrificantes. No estágio inicial (5 kg e 240 rpm), o óleo de mamona demonstrou desempenho superior no regime limite, reduzindo o coeficiente de atrito médio para 0,0696 em comparação com 0,0892 para o óleo mineral. Esse comportamento é consistente com a capacidade do ácido ricinoleico de formar camadas adsorvidas de alta densidade que passavam as asperezas do bronze.

Figura 42 – Comportamento do CoF em bronze TM-23 com o óleo e rugosidade 1



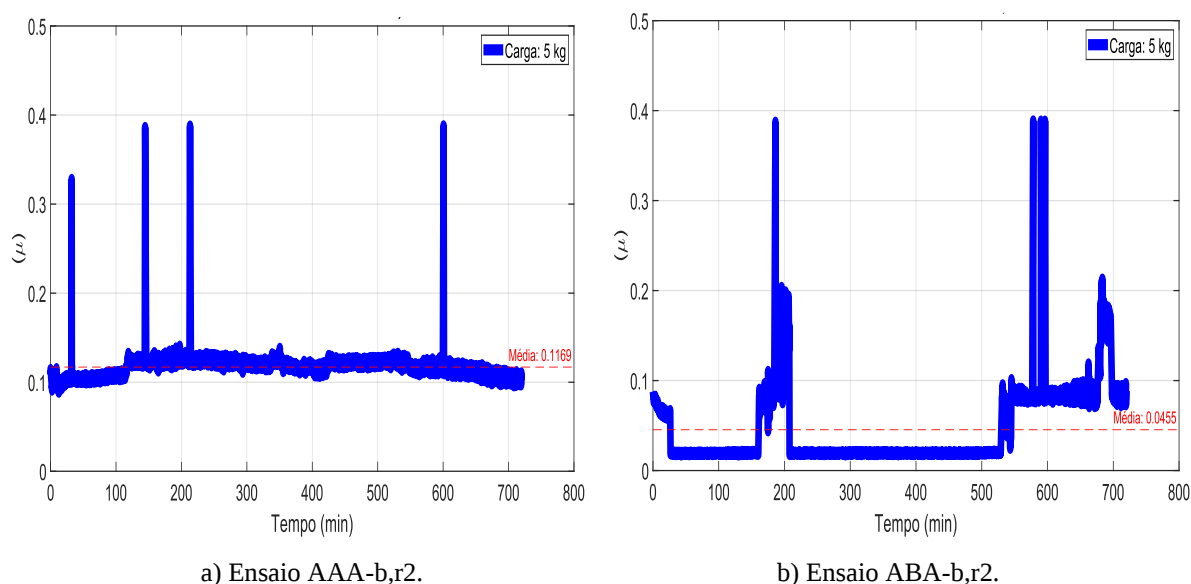
Fonte: Elaborado pelo autor.

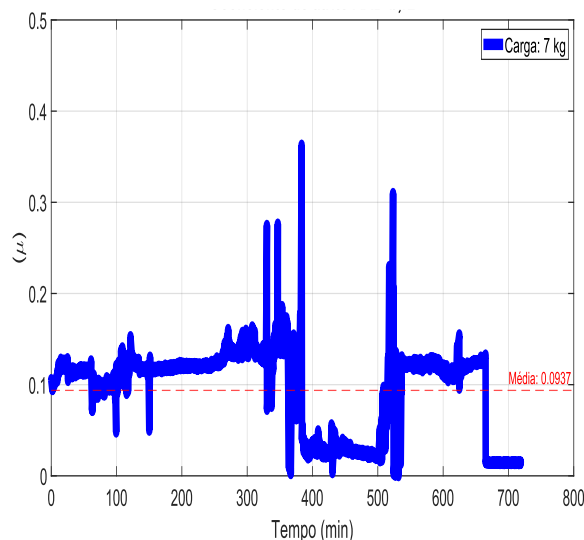
No entanto, o aumento da carga (c e d) reverteu essa tendência, enquanto o óleo mineral conseguiu estabelecer um filme fluido eficiente que reduziu drasticamente seu atrito para 0,0387, o óleo vegetal manteve um alto CoF de 0,0727. Essa resistência persistente no biolubrificante sugere que, nessas condições específicas, sua alta viscosidade gerou perdas de energia devido ao cisalhamento interno (arrasto viscoso) ou impediu o pleno desenvolvimento da sustentação hidrodinâmica, uma limitação reológica documentada por Kumar Kurre *et al.* (2023) em configurações de contato conformes.

#### 4.3.1.6 Coeficiente de atrito em Bronze TM-23 com a graxa como lubrificante e rugosidade 2

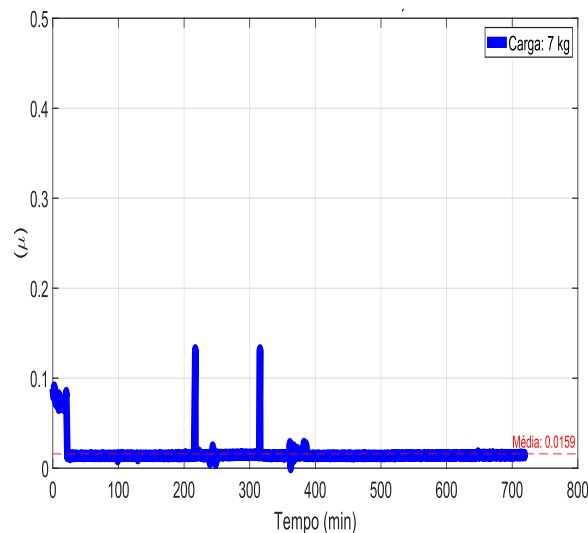
A análise comparativa apresentada na Figura 43 demonstra a capacidade superior de lubrificação limite da graxa vegetal sob as condições de carga e velocidade avaliadas. A 5 kg e 330 rpm (a e b), a formulação de soja reduziu significativamente o coeficiente de atrito para 0,0455, em comparação com o comportamento instável e elevado da graxa mineral (COF 0,1169).

Figura 43 – Comportamento do CoF em bronze TM-23 com a graxa e rugosidade 2





c) Ensaio AAD-b,r2.



d) Ensaio ABD-b,r2.

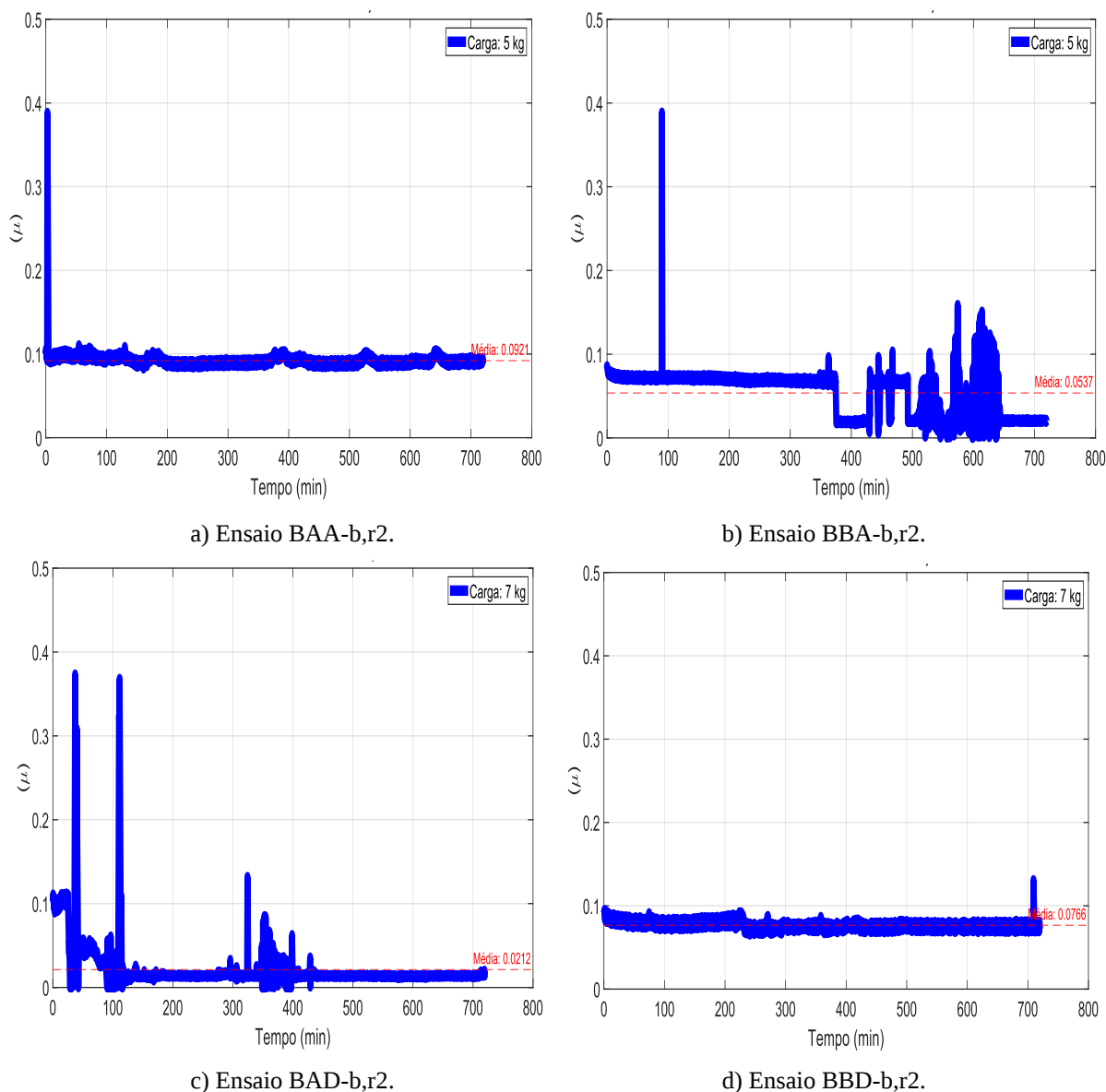
Fonte: Elaborado pelo autor.

Essa tendência se intensificou quando a carga foi aumentada para 7 kg (c e d), onde a graxa mineral exibiu uma resposta aleatória e resistente ao deslizamento (COF 0,0937), enquanto o biolubrificante estabeleceu um regime estável com um coeficiente de atrito mínimo de 0,0159. Esse ótimo desempenho é atribuído à alta polaridade dos ésteres de ácidos graxos, que formam um filme multi molecular fisicamente adsorvido na superfície metálica, proporcionando proteção superior contra o contato da rugosidade em comparação com bases minerais não polares, um mecanismo baseado nos estudos de estrutura química de (Adhvaryu; Erhan; Perez, 2004a).

#### 4.3.1.7 Coeficiente de atrito em Bronze TM-23 com o óleo como lubrificante e rugosidade 2

Os resultados finais da seção apresentados na Figura 44 ilustram uma transição crítica no mecanismo de lubrificação. No cenário de 5 kg e 330 rpm (a e b), o óleo de mamona demonstrou uma capacidade superior de mitigar o atrito durante a fase de amaciamento, reduzindo o coeficiente de atrito médio para 0,0537 em comparação com a instabilidade inicial do óleo mineral (0,0921). Essa proteção imediata é atribuída à rápida adsorção de moléculas polares de ácido ricinoleico no bronze, formando uma camada limite eficaz.

Figura 44 – Comportamento do CoF em bronze TM-23 com o óleo e rugosidade 2



Fonte: Elaborado pelo autor.

No entanto, quando a carga foi aumentada para 7 kg (c e d), o óleo mineral exibiu sua vantagem reológica ao entrar em um regime de lubrificação hidrodinâmica estável, atingindo um coeficiente de atrito mínimo de 0,0212. Em contraste, embora o óleo vegetal tenha mantido uma película constante sem rupturas, seu coeficiente de atrito permaneceu significativamente maior (0,0766), demonstrando que sua alta viscosidade induziu uma resistência ao cisalhamento do fluido (arrasto viscoso) que o impediu de atingir os baixos níveis de atrito do regime hidrodinâmico do óleo mineral.

Em resumo, o desempenho tribológico revelou uma dicotomia funcional dependente da natureza físico-química do lubrificante. Para graxas, a formulação mineral apresentou

estabilidade reológica superior em condições severas, enquanto a graxa de soja, embora eficaz na redução do atrito por meio da adsorção polar em regimes de lubrificação limite, mostrou suscetibilidade à degradação termo-oxidativa sob altas cargas, resultando em flutuações críticas no coeficiente de atrito.

No caso dos óleos, o comportamento foi regido pela competição entre viscosidade e formação de película. O óleo de mamona demonstrou uma capacidade excepcional de estabelecer películas estáveis e proteger a superfície por meio de fisissorção imediata (tempo de amaciamento mais curto); no entanto, sua alta viscosidade gerou um aumento no coeficiente de atrito em múltiplos cenários devido ao arrasto hidrodinâmico (arrasto viscoso). Por outro lado, o óleo mineral, apesar da maior instabilidade inicial, alcançou regimes de lubrificação fluida de baixo atrito em condições de alta velocidade.

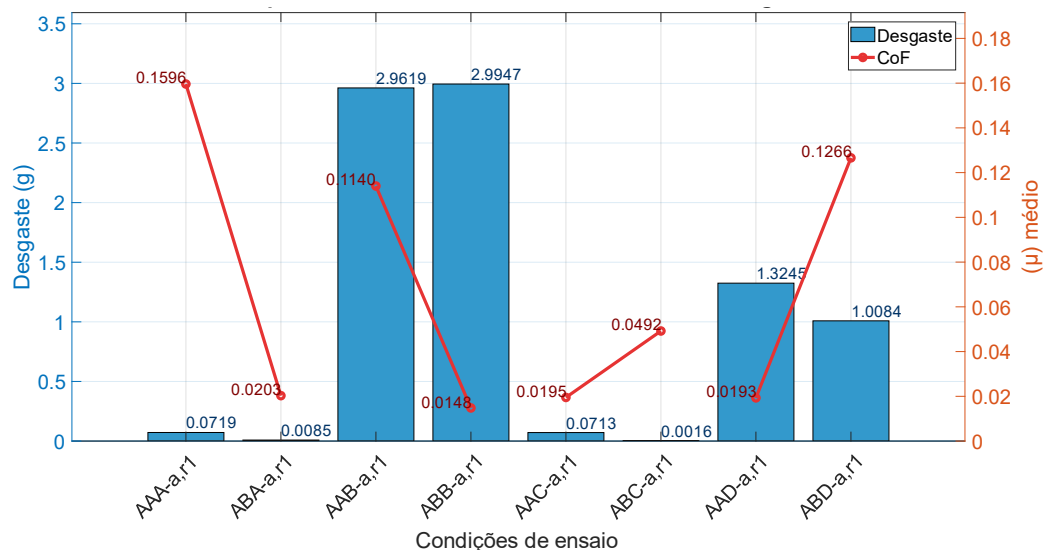
#### **4.3.2 Análise de desgaste**

Esta seção apresenta a análise do desgaste dos discos, resultante dos ensaios tribológicos realizados. Gráficos comparativos foram criados para ilustrar a perda de massa contra o coeficiente de atrito para cada configuração avaliada. Vale ressaltar que, como apontam Affatato; Ruggiero; Merola, (2015), existe um equívoco comum de que um alto coeficiente de atrito está diretamente associado a uma alta taxa de desgaste. No entanto, essa relação nem sempre é linear ou necessariamente válida. Embora possa haver casos em que ambos os parâmetros evoluam de forma semelhante, o atrito e o desgaste representam fenômenos distintos e respondem a mecanismos distintos dentro do sistema tribológico. Portanto, suas análises devem ser realizadas de forma independente para uma interpretação precisa do desempenho tribológico.

##### **4.3.2.1 Desgaste no F.F.N. com rugosidade 1**

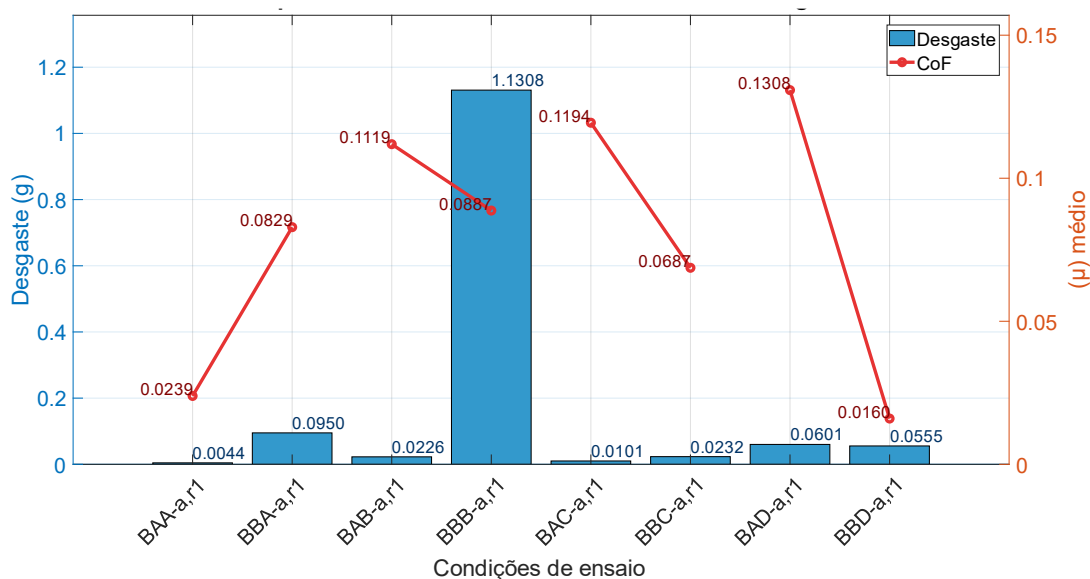
As Figura 45 e Figura 46 mostram os gráficos de desgaste para graxas e óleos lubrificantes, respectivamente. Elas representam o desgaste como barras azuis e o coeficiente de atrito como pontos vermelhos.

Figura 45 – Desgaste em F.F.N. rugosidade 1 com graxas lubrificantes



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 46 – Desgaste em F.F.N. rugosidade 1 com óleos lubrificantes



Fonte: Elaborado pelo autor.

A análise de desgaste (Figura 45) revela uma transição crítica no mecanismo de proteção tribológica. Em condições moderadas (5 kg), a graxa de soja apresentou capacidade antidesgaste excepcional, reduzindo a perda de massa em uma ordem de magnitude em comparação com a graxa mineral de referência (por exemplo, 0,0016 g vs. 0,0713 g a 240 rpm). Esse desempenho superior se baseia na alta polaridade dos ácidos graxos, que formam monocamadas quimicamente adsorvidas resistentes ao cisalhamento (Adhvaryu; Erhan; Perez, 2004a).

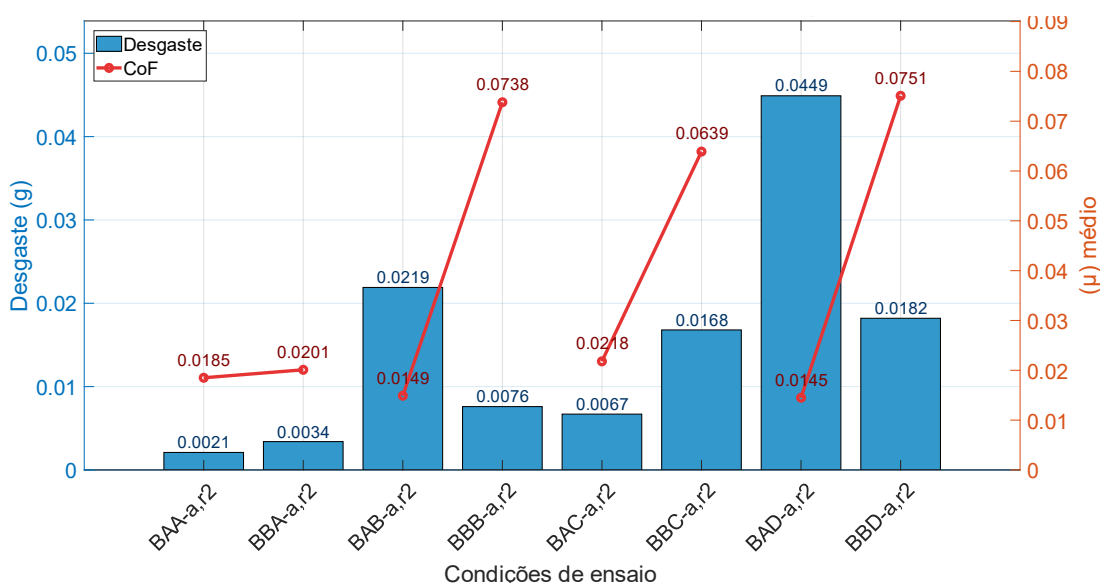
No entanto, a combinação de alta carga e velocidade (7 kg/330 rpm) precipitou um regime de desgaste severo catastrófico em ambas as amostras, com perdas de massa (2,9 g), indicando ruptura completa da película lubrificante. Nesse cenário crítico, a graxa vegetal de soja não conseguiu mitigar o desgaste devido à degradação termo-oxidativa de sua estrutura insaturada, uma limitação de estabilidade em altas temperaturas, descrita por (Adhvaryu; Erhan; Perez, 2004b).

A análise apresentada da Figura 46 demonstra uma correlação crítica entre a velocidade de deslizamento e a eficácia protetora do biolubrificante. Em condições de alta velocidade (330 rpm), o óleo de mamona apresentou uma grave incapacidade de prevenir o desgaste, atingindo uma perda de massa crítica de 1,1308 g sob uma carga de 7 kg, em nítido contraste com a estabilidade do óleo mineral (0,0226 g). Essa falha tribológica é atribuída ao fenômeno de "falta de contato" descrito por Kumar Kurre *et al.* (2023), no qual a alta viscosidade do óleo vegetal impede a reposição do fluido na zona de contato em altas taxas de cisalhamento, causando a ruptura do filme e o superaquecimento local. No entanto, ao reduzir a velocidade para 240 rpm, a limitação reológica é atenuada, permitindo que a adsorção química de ácidos graxos proteja efetivamente a superfície Ahmed *et al.* (2025), resultando em taxas de desgaste equivalentes (0,0555 g) e até mesmo competitivas com a referência mineral (0,0601 g) sob alta carga.

#### 4.3.2.2 Desgaste no F.F.N. com rugosidade 2

A Figura 47 mostram os gráficos de desgaste no ferro fundido nodular agora com rugosidade 2.

Figura 47 – Desgaste em F.F.N. rugosidade 2 com óleos lubrificantes



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados de desgaste apresentados na Figura 47 revelam uma interação crítica entre a rugosidade e a reologia do lubrificante, exibindo um comportamento oposto ao observado em graxas. Nesse cenário de menor rugosidade (Rugosidade 1), observou-se uma tendência geral de aumento do desgaste, atingindo valores críticos de 0,0449 g para óleo mineral e 0,0182 g para óleo vegetal de mamona sob carga severa (Configuração 4). Esse fenômeno sugere que a superfície “mais lisa” não possui a textura necessária para atuar como “micro-reservatórios” de lubrificante, limitando a disponibilidade de fluido na interface de contato e promovendo a ruptura do filme. No entanto, destaca-se a capacidade do óleo de mamona de mitigar esse efeito adverso nas condições mais críticas (Configurações 2 e 4), reduzindo o desgaste para menos da metade em comparação com o óleo mineral (0,0076 g vs 0,0219 g), uma vantagem atribuível à forte adesão molecular do ácido ricinoleico que compensa a falta de retenção mecânica da superfície (Hamnas; Panicker, 2025; Kumar Kurre *et al.*, 2023).

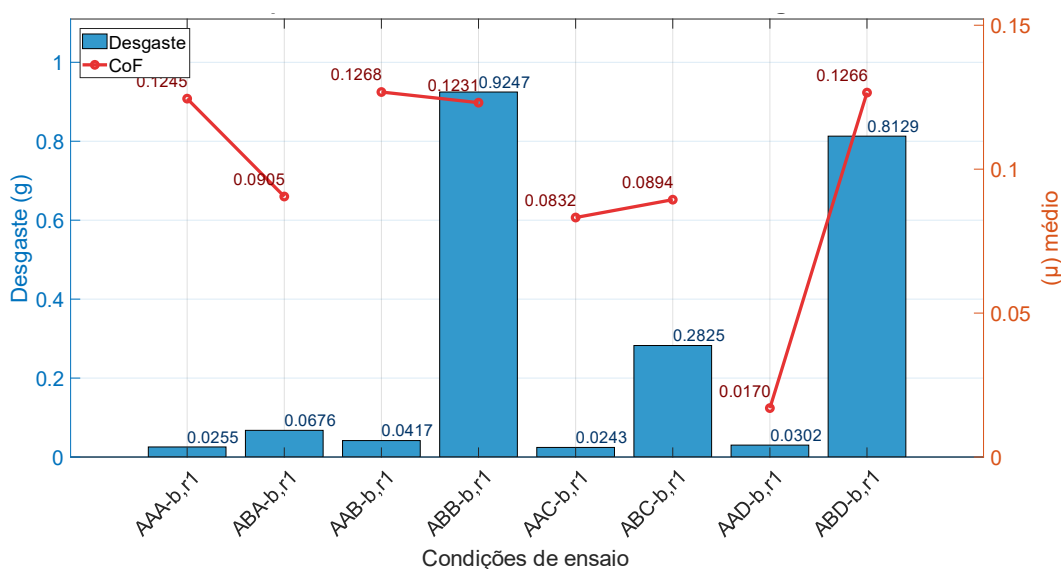
#### 4.3.2.3 Desgaste no bronze TM-23 com rugosidade 1

A Figura 48 e a Figura 49 mostram os gráficos de desgaste para discos de bronze com graxa e óleos lubrificantes.

A análise comparativa de desgaste (Figura 48) revela uma disparidade crítica na estabilidade tribológica das graxas avaliadas. Enquanto a formulação mineral demonstrou robustez, mantendo taxas de desgaste mínimas e constantes independentemente da severidade

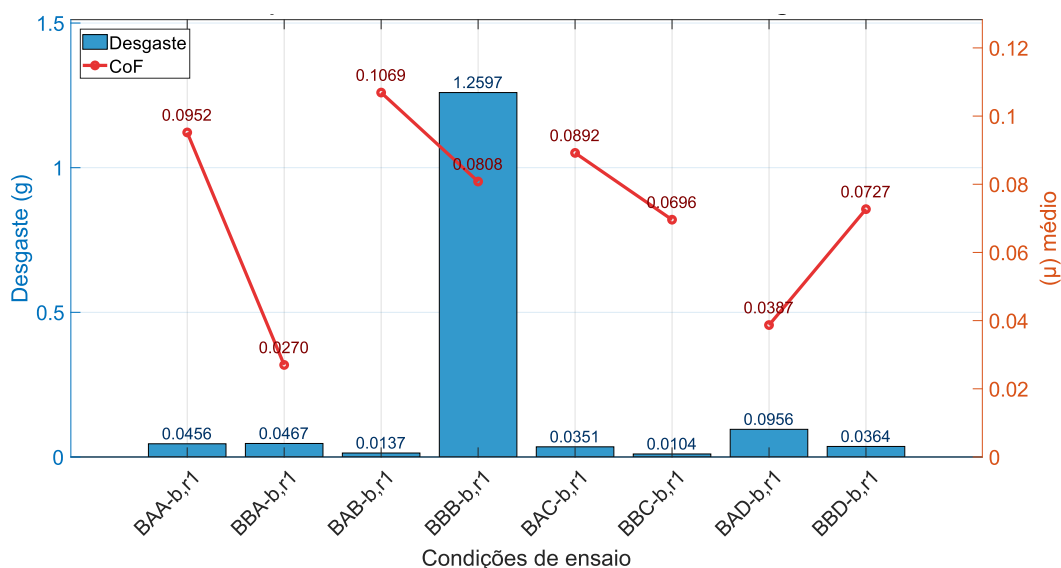
do ensaio (variando de 0,0243 g a 0,0417 g), a graxa de soja apresentou severa degradação funcional sob carga. Especificamente, nas configurações que exigem maior energia (2 e 4), o desgaste com o biolubrificante atingiu valores críticos de 0,9247 g e 0,8129 g, respectivamente, excedendo em mais de 20 vezes o da sua contraparte mineral. Esse colapso no desempenho protetor sugere a ativação de um mecanismo de desgaste oxidativo-corrosivo induzido pela temperatura. De acordo com Adhvaryu, Erhan e Perez (2004b), o calor friccional gerado sob essas cargas causa rápida polimerização e acidificação da base vegetal insaturada, resultando na ruptura do filme lubrificante e em um ataque químico na superfície, que a base mineral inerte conseguiu evitar.

Figura 48 – Desgaste em bronze TM-23 rugosidade 1 com graxas lubrificantes



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 49 – Desgaste em bronze TM-23 rugosidade 1 com óleos lubrificantes



Fonte: Elaborado pelo autor.

A análise de desgaste apresentada na Figura 49 revela um comportamento tribológico dual condicionado pelo regime de operação. Em três das quatro configurações avaliadas (1, 3 e 4), o óleo de mamona demonstrou notável competitividade, igualando o desempenho do óleo mineral em condições semelhantes (0,0467 g vs. 0,0456 g) e superando-o significativamente em cenários de baixa velocidade, onde reduziu o desgaste em até 60% (Configuração 4: 0,0364 g vs. 0,0956 g). Essa dominância em regimes controlados valida a eficácia da camada limite formada pela adsorção do ácido ricinoleico Ahmed *et al.* (2025). Contudo, a Configuração 2 (330 rpm / 7 kg) expôs o limite funcional do biolubrificante, enquanto o óleo mineral alcançou uma lubrificação hidrodinâmica (0,0137 g), o óleo vegetal sofreu um colapso catastrófico da película, resultando em um desgaste de 1,2597 g. Esta falha localizada sob alto cisalhamento sugere que a alta viscosidade do óleo de mamona impediu a reposição oportuna do contato (falta de lubrificação) ou induziu um aquecimento viscoso crítico que degradou suas propriedades protetoras, um fenômeno limitante descrito por (Kumar Kurre *et al.*, 2023).

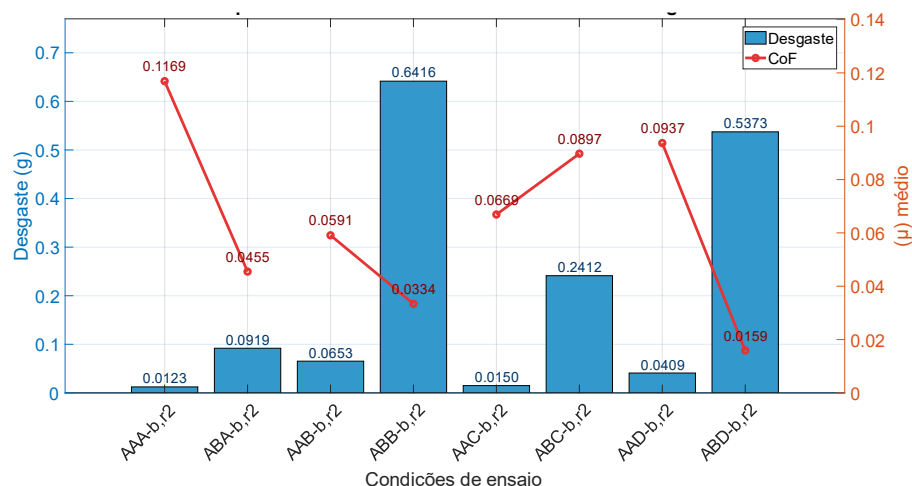
#### 4.3.2.4 Desgaste no bronze TM-23 com rugosidade 2

Na Figura 50 e Figura 51 são apresentados os gráficos de desgaste gerados em discos de bronze com rugosidade 2 com graxas e óleos lubrificantes.

Os resultados de desgaste apresentados na Figura 50 confirmam a tendência observada anteriormente (Figura 48), demonstrando que o comportamento tribológico dessas graxas

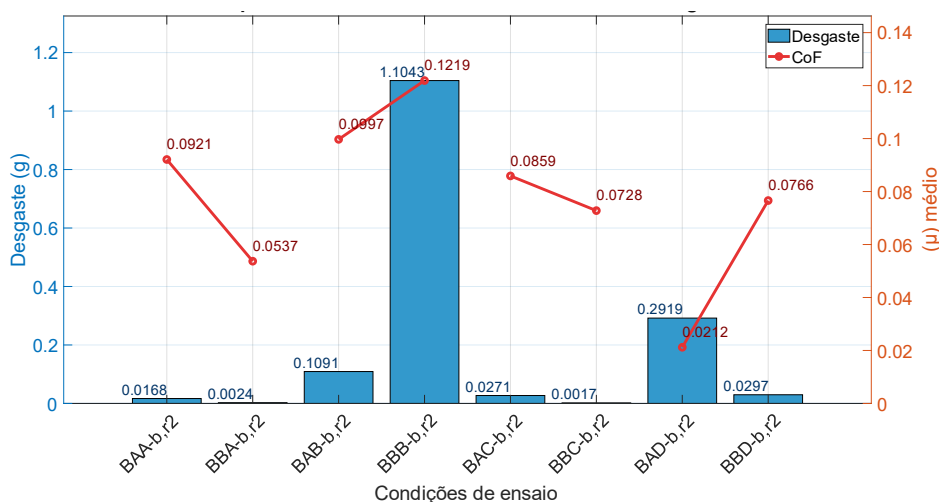
depende intrinsecamente de sua estabilidade térmica, e não de variações na rugosidade. Em todas as configurações avaliadas, a graxa mineral manteve um regime de desgaste controlado e mínimo (máximo de 0,0653 g), indicando uma película lubrificante robusta. Em contraste, a graxa de soja apresentou consistentemente taxas de perda de material mais elevadas, atingindo valores críticos de 0,6416 g (Configuração 2) e 0,5373 g (Configuração 4). Esse desgaste elevado e consistente, replicado em diferentes topografias, confirma a suscetibilidade da base vegetal à degradação oxidativa sob atrito. De acordo com Adhvaryu, Erhan e Perez (2004b), a geração de calor local promove a ruptura da estrutura estólida/éster e a formação de subprodutos ácidos, impedindo a formação de uma tribocamada eficaz capaz de igualar a proteção da graxa mineral de referência.

Figura 50 – Desgaste em bronze TM-23 rugosidade 2 com graxas lubrificantes



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 51 – Desgaste em bronze TM-23 rugosidade 2 com óleos lubrificantes



Fonte: Elaborado pelo autor.

A análise da Figura 51, correspondente a superfícies com maior rugosidade ( $r_2$ ), confirma o melhor desempenho tribológico do óleo de mamona em regimes de lubrificação limite e mista. Em três das quatro configurações (1, 3 e 4), o biolubrificante reduziu o desgaste em uma ordem de magnitude em comparação com o óleo mineral; a Configuração 4 destaca-se, onde a perda de massa diminuiu drasticamente de 0,2919 g (mineral) para 0,0297 g (vegetal). Esse desempenho sugere que, sob topografia de superfície mais agressiva, o filme limite formado pela fisissorção do ácido ricinoleico é mecanicamente mais robusto para passivar as asperezas do que o filme de óleo mineral (Ahmed *et al.*, 2025; Hamnas; Panicker, 2025).

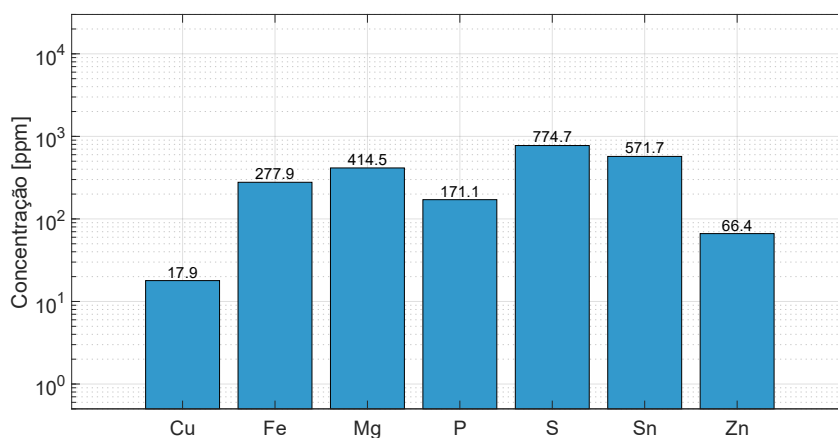
Entretanto, a exceção crítica da Configuração 2 (330 rpm / 7 kg), onde o desgaste vegetal atingiu um pico de 1,1043 g, corrobora a sensibilidade do fluido viscoso a altas taxas de cisalhamento; nessas condições extremas, a incapacidade de repor o contato (falta de contato) descrita por Kumar Kurre *et al.* (2023) prevalece sobre a proteção química, resultando em um desgaste severo maior do que o observado em superfícies mais lisas (Figura 49).

Finalmente, a integração dos resultados obtidos nesta seção corrobora uma premissa fundamental em tribologia, o desacoplamento entre o coeficiente de atrito e a taxa de desgaste específica. A análise geral revelou múltiplos cenários em que mecanismos de adsorção química mitigaram a perda de material (baixo desgaste), apesar de induzirem considerável resistência ao deslizamento (alto coeficiente de atrito devido ao arrasto viscoso), demonstrando que a dissipação de energia por atrito e a remoção de material respondem a fenômenos físicos distintos. A exceção crítica registrada na Configuração 2 com óleo vegetal (Figura 51), onde os valores máximos de atrito e desgaste convergiram, não estabelece uma correlação direta geral, mas sim identifica um ponto de colapso no regime de lubrificação.

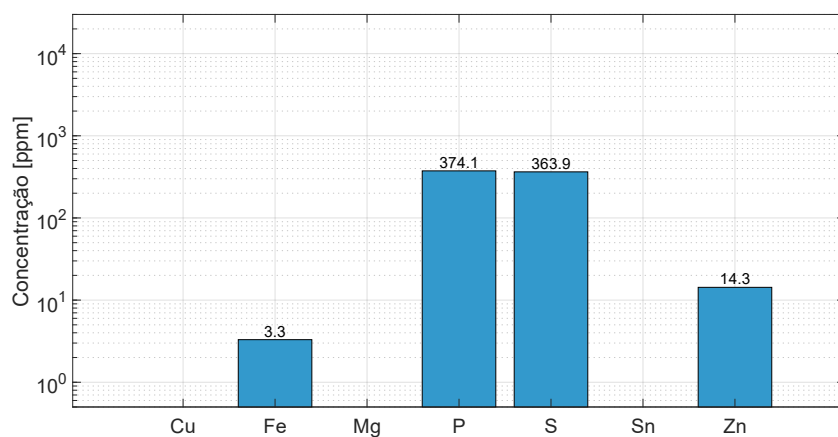
#### 4.4 QUALIFICAÇÃO E QUANTIFICAÇÃO DE ELEMENTOS EM ENSAIOS UTILIZANDO XRF

Para realizar uma análise detalhada nesta seção, visando identificar e quantificar os elementos presentes nas amostras coletadas durante os diferentes ensaios tribológicos com lubrificantes. Para maior clareza dos resultados obtidos nos elementos presentes em cada ensaio, a Figura 52 ilustra os gráficos que quantificam os elementos presentes nos lubrificantes, medidos em partes por milhão (ppm), em escala logarítmica, tanto graxas quanto óleos em seu estado puro, sendo a) graxa mineral à base de sabão de cálcio, b) graxa vegetal à base de óleo de soja, c) óleo mineral PNL-30 e d) óleo vegetal de mamona. Assim como na seção dedicada à análise do coeficiente de atrito, os mesmos ensaios foram selecionados para esta etapa, a fim de manter a consistência metodológica e permitir comparações diretas entre as seções. Essa estratégia garante uma abordagem analítica mais aprofundada e uma avaliação crítica consistente dos resultados obtidos em cada ensaio.

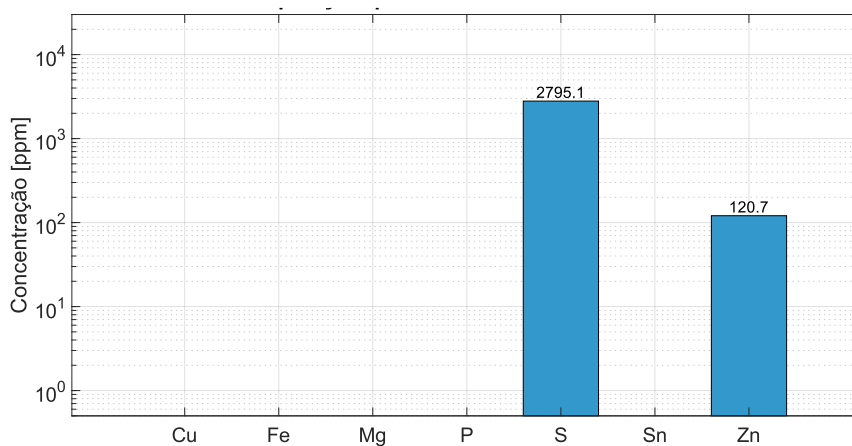
Figura 52 – Composição química dos lubrificantes puros



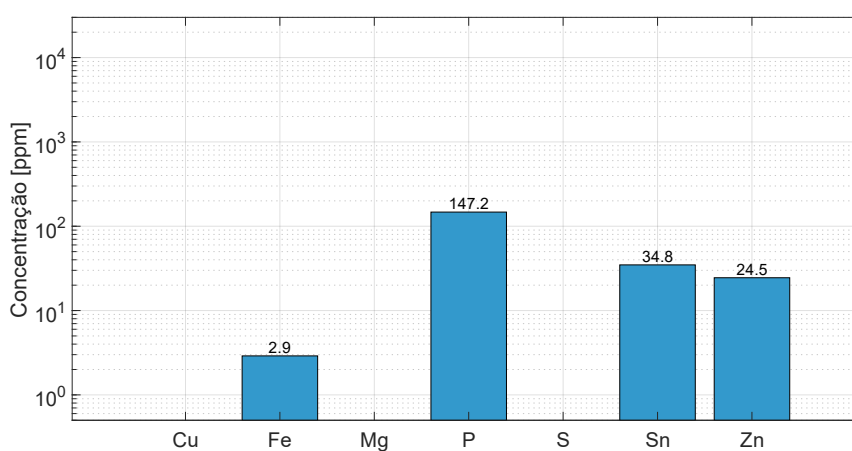
a) Composição química da graxa mineral à base de sabão de cálcio.



b) Composição química da graxa vegetal à base de óleo de soja.



c) Composição química do óleo mineral PNL-30.



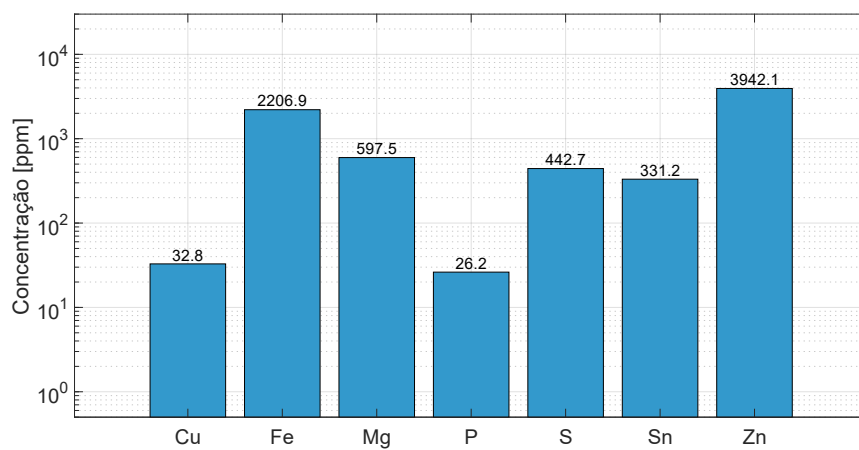
d) Composição química do óleo vegetal de mamona.

Fonte: Elaborado pelo autor.

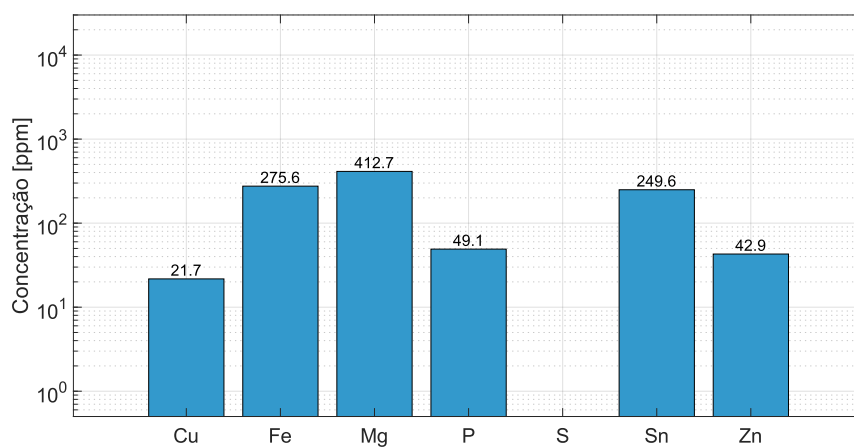
#### 4.4.1 Amostras de graxa lubrificante em F.F.N. com rugosidade 1

A Figura 53 mostra os gráficos obtidos após a análise por espectrometria de raios X. Os gráficos são para as amostras a) AAC-a,r1; b) ABC-a,r1; c) AAD-a,r1 e d) ABD-a,r1.

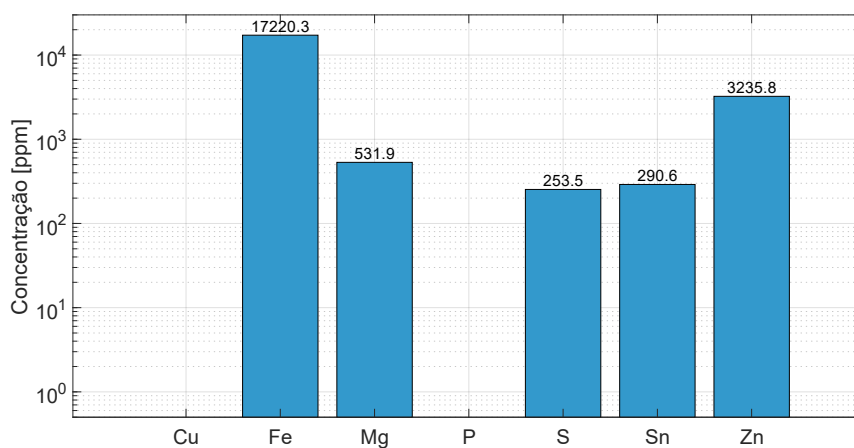
Figura 53 – Concentrações de elementos em amostras de graxa de F.F.N. e r1



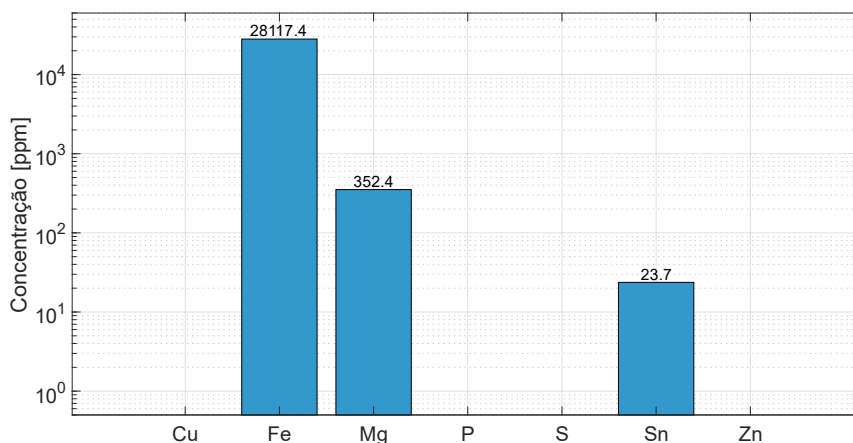
a) Ensaio AAC-a,r1.



b) Ensaio ABC-a,r1.



c) Ensaio AAD-a,r1.



d) Ensaio ABD-a,r1.

Fonte: Elaborado pelo autor.

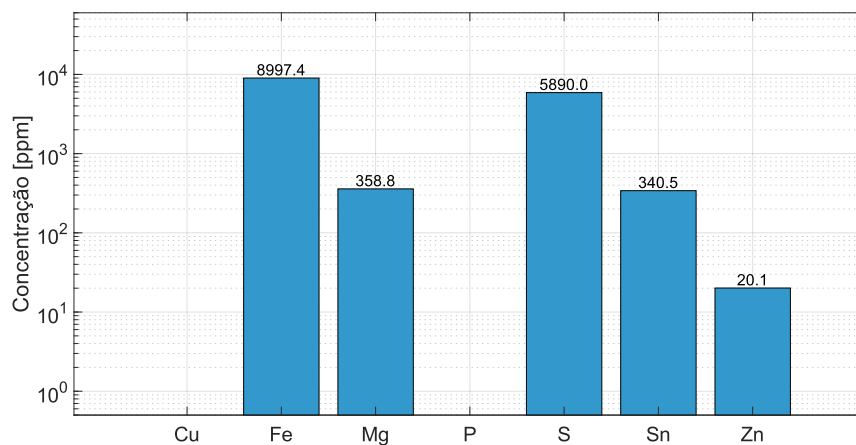
A Figura 53 mostra as concentrações de elementos detectadas por XRF como resultado do desgaste gerado nos discos ensaiados com o tribômetro Pino-sobre-Disco. Esta seção analisa apenas os ensaios realizados com graxa mineral e graxa vegetal de soja. Nos itens a) e b), correspondentes à condição de 5 kg, observa-se uma maior concentração de Fe e Mg, consistente com o desgaste característico do disco de ferro fundido nodular. No entanto, o item a) apresenta níveis ainda mais elevados desses elementos, o que é consistente com a maior taxa de desgaste registrada nesse ensaio, conforme ilustrado na Figura 45 correspondente.

Na segunda parte da Figura 53, itens c) e d), a concentração de Fe aumenta novamente como consequência direta tanto do desgaste do material base quanto do aumento da carga normal de 5 kg para 7 kg. Embora o gráfico d) mostre uma concentração de Fe maior, a Figura 45 indica que o maior desgaste ocorreu no ensaio c), realizado com graxa vegetal, o que demonstra que a correlação entre concentração elementar e perda de massa nem sempre é linear, sendo também influenciada pela distribuição superficial e pela morfologia do desgaste.

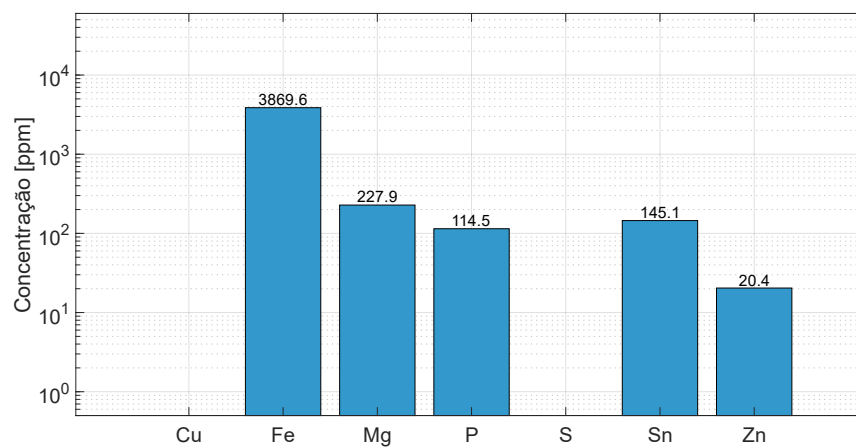
#### 4.4.2 Amostras de óleo lubrificante em F.F.N. com rugosidade 1

A Figura 54 mostra os gráficos de concentração de elementos nas amostras obtidas com o óleo lubrificante. Em a) BAA-a,r1; b) BBA-a,r1; c) BAD-a,r1 e d) BBD-a,r1.

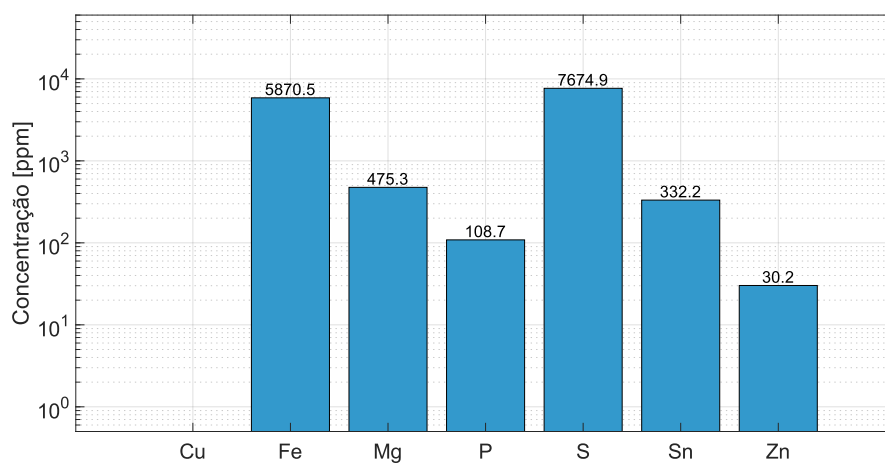
Figura 54 – Concentrações de elementos em amostras de óleo de F.F.N. e r1



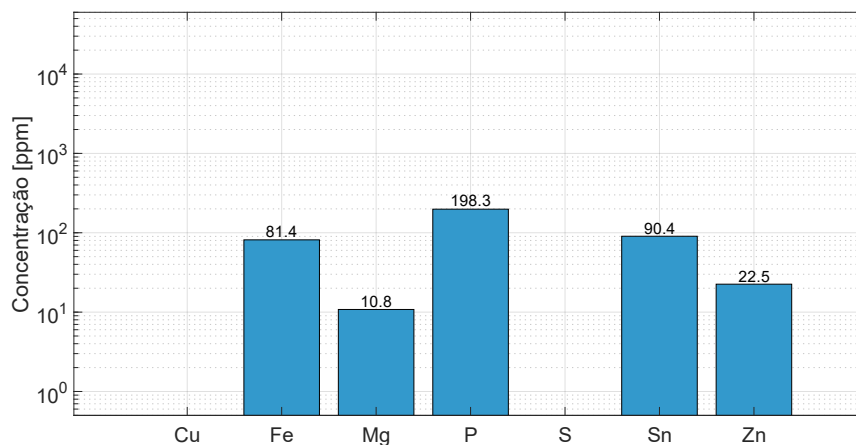
a) Ensaio BAA-a,r1.



b) Ensaio BBA-a,r1.



c) BAD-a,r1.



d) BBD-a,r1.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A análise prossegue com ensaios realizados utilizando óleos lubrificantes. Os itens a) e b) da Figura 54 mostram uma alta concentração de Fe, associada ao desgaste do disco de ferro fundido nodular. O item a) também revela um nível considerável de enxofre (S), característico de óleos minerais devido aos compostos de enxofre presentes em sua formulação. Embora uma comparação direta entre os dois itens sugira uma maior concentração de Fe em a), implicando maior desgaste, a Figura 46 mostra que o ensaio b) (BBA-a,r1) apresentou, na verdade, uma maior perda de massa. Essa discrepância destaca a importância de interpretar os resultados de XRF em conjunto com as métricas diretas de desgaste, uma vez que a deposição de partículas na superfície nem sempre reflete linearmente a massa removida.

Na segunda parte da Figura 54, correspondente aos itens c) e d), observa-se novamente uma alta concentração de Fe em c), consistente com o desgaste do disco, bem como um alto teor de enxofre derivado do óleo mineral utilizado.

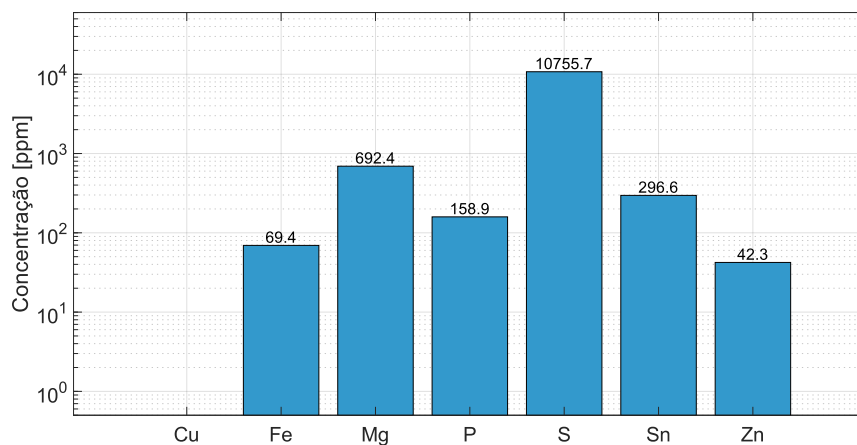
#### 4.4.3 Amostras de óleo lubrificante em F.F.N. com rugosidade 2

A Figura 55 mostra os gráficos de concentração de elementos nas amostras obtidas com o óleo lubrificante. Em a) BAA-a,r2; b) BBA-a,r2; c) BAD-a,r2 e d) BBD-a,r2.

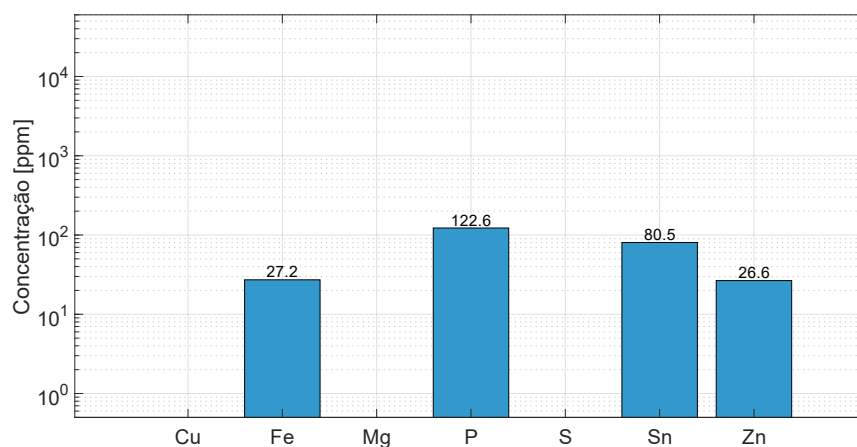
A Figura 55 mostra as concentrações elementares obtidas para as amostras lubrificadas com óleo mineral e vegetal. O item a) destaca a alta presença de enxofre (S), uma característica inerente ao óleo mineral, enquanto os níveis de Mg e Fe são relativamente baixos, sugerindo menor desgaste do disco nessas condições. Uma tendência semelhante é observada no item b), correspondente ao óleo vegetal, onde a maior concentração é de fósforo (P), um elemento

característico do óleo de mamona devido à sua composição natural, e cujos baixos níveis de Fe e Mg também indicam uma baixa taxa de desgaste.

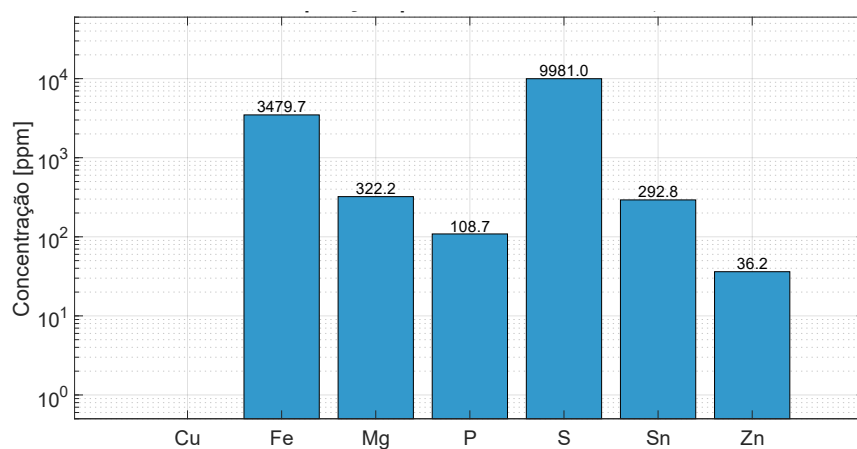
Figura 55 – Concentrações de elementos em amostras de óleo de F.F.N. e r2



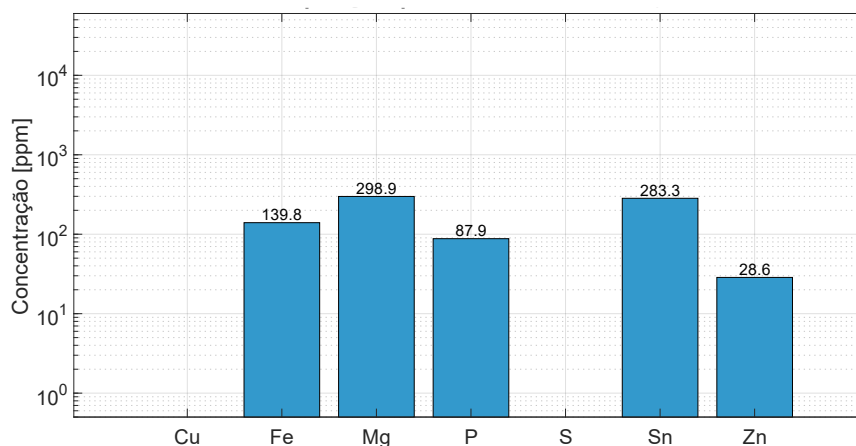
a) Ensaio BAA-a,r2.



b) Ensaio BBA-a,r2.



c) Ensaio BAD-a,r2.



d) Ensaio BBD-a,r2.

Fonte: Elaborado pelo autor.

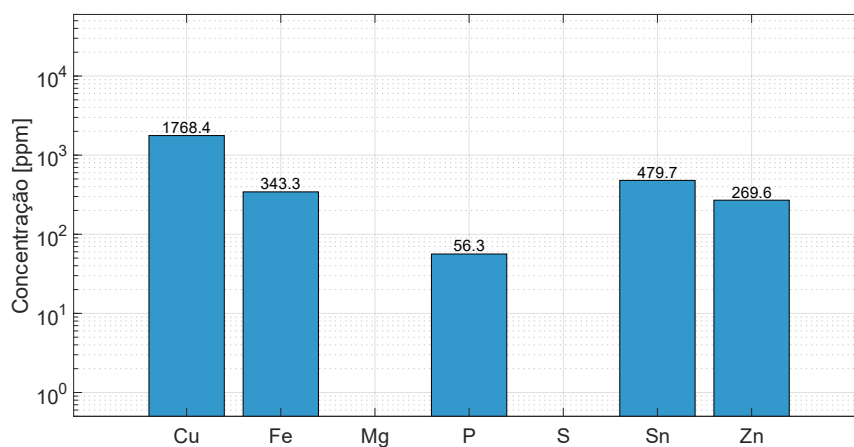
Na segunda parte da análise (itens c) e d)), uma tendência comparável é mantida. Em c), observa-se uma alta concentração de enxofre, novamente associada ao óleo mineral, juntamente com um aumento significativo de Fe resultante do desgaste do disco. Em d), por outro lado, Fe e Mg predominam em concentrações baixas, ambas características do disco de ferro fundido nodular. A comparação entre c) e d) mostra concentrações mais elevadas em c), o que é consistente com a maior taxa de desgaste registrada naquele ensaio com óleo mineral, conforme confirmado na Figura 47.

#### 4.4.4 Amostras de graxa lubrificante em bronze TM-23 com rugosidade 1

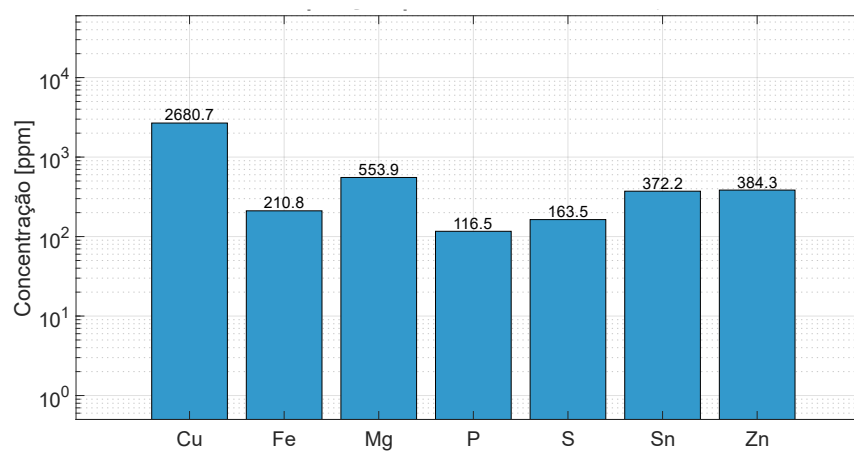
A Figura 56 mostra os gráficos de concentração de elementos nas amostras obtidas com a graxa lubrificante. Em a) AAA-b,r1; b) ABA-b,r1; c) AAD-b,r1 e d) ABD-b,r1.

Os itens a) e b) da Figura 56 apresentam a primeira parte da análise, onde são observadas concentrações semelhantes de Cu, Sn e Zn, elementos característicos do desgaste de discos de bronze. No entanto, tanto o cobre quanto o zinco aparecem em níveis mais elevados no item b), sugerindo uma taxa de desgaste maior nesse ensaio. Essa interpretação é confirmada pela comparação dos resultados com os valores de perda de massa mostrados na Figura 48.

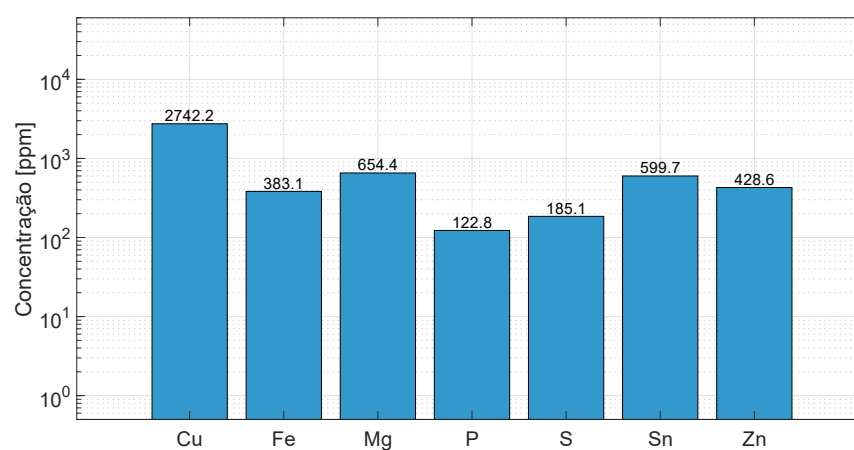
Figura 56 – Concentrações de elementos em amostras de graxa de bronze e r1



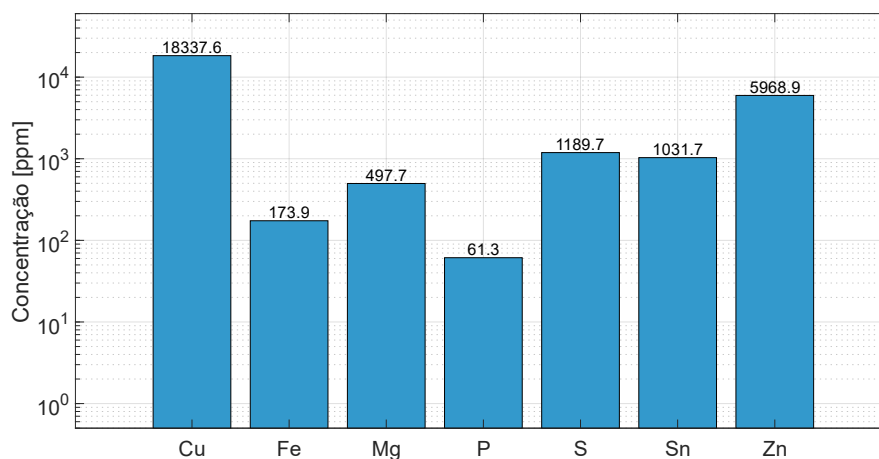
a) Ensaio AAA-b,r1.



b) Ensaio ABA-b,r1.



c) Ensaio AAD-b,r1.



d) Ensaio ABD-b,r1.

Fonte: Elaborado pelo autor.

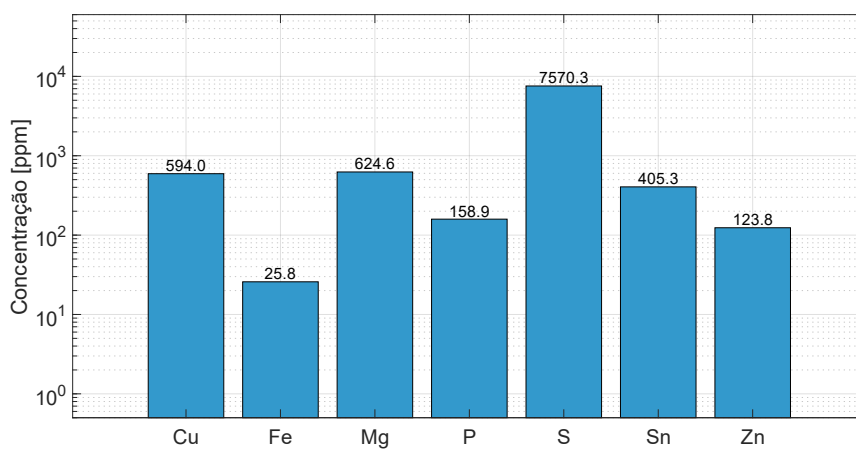
Os itens c) e d) mostram a mesma tendência, ambos exibindo concentrações significativas de Cu, Sn e Zn, novamente associadas ao desgaste do bronze. No entanto, no item d), esses níveis são notavelmente mais altos, indicando um desgaste mais acentuado quando se utilizou graxa vegetal. Essa conclusão é consistente com os dados de desgaste apresentados na Figura 48, onde o ensaio ABD-b,r1 mostra uma perda de material maior em comparação com o AAD-b,r1.

#### 4.4.5 Amostras de óleo lubrificante em bronze TM-23 com rugosidade 1

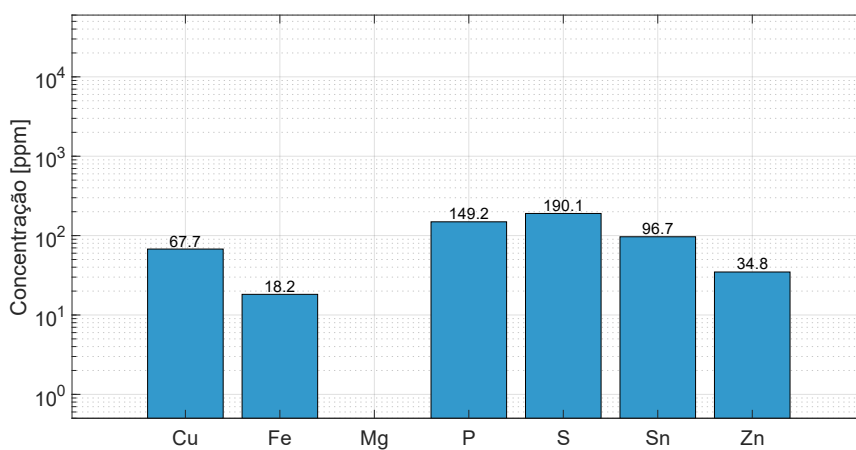
A Figura 57 mostra os gráficos de concentração de elementos nas amostras obtidas com o óleo lubrificante. Em a) BAC-b,r1; b) BBC-b,r1; c) BAD-b,r1 e d) BBD-b,r1.

Nos itens a) e b) da Figura 57, o caso a) mostra uma alta concentração de enxofre, atribuída ao óleo mineral, acompanhada por níveis médios de Cu, Sn e Zn, elementos característicos do desgaste de discos de bronze. Em contraste, o item b) mostra uma concentração significativa de fósforo, típica de óleo vegetal, e níveis consideravelmente mais baixos de Cu, Sn e Zn, indicando menor desgaste em comparação com o ensaio mostrado em a). Essa interpretação é consistente com os resultados de perda de massa apresentados na Figura 49.

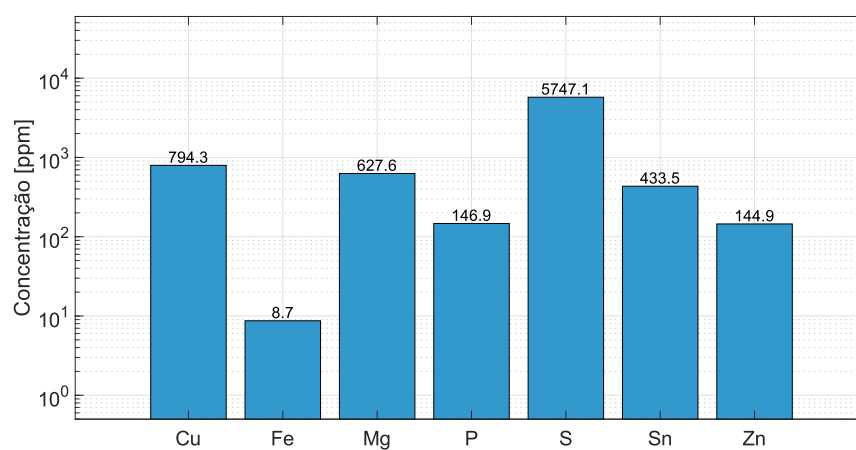
Figura 57 – Concentrações de elementos em amostras de óleo de bronze e r1



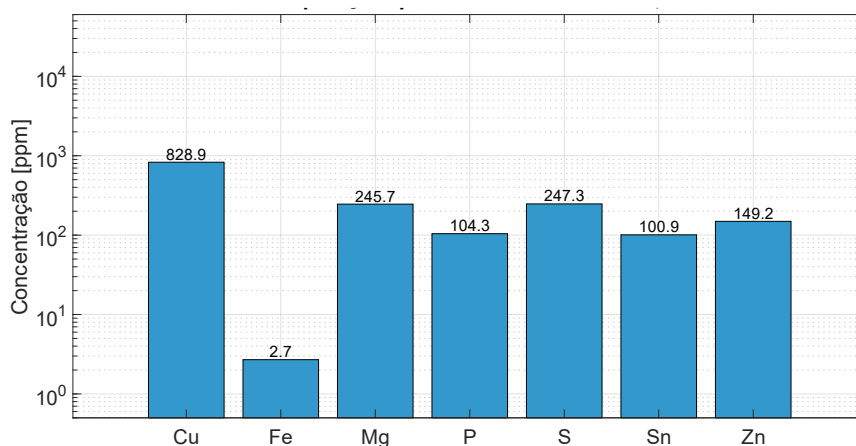
a) Ensaio BAC-b,r1.



b) Ensaio BBC-b,r1.



c) Ensaio BAD-b,r1.



d) Ensaio BBD-b,r1.

Fonte: Elaborado pelo autor.

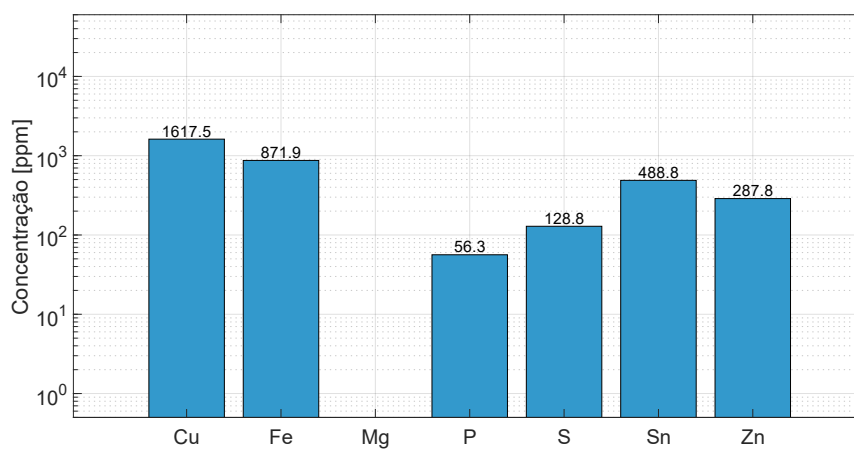
Nos itens c) e d), a tendência mostra um comportamento diferenciado, em c) o enxofre predomina novamente devido ao óleo mineral, seguido por concentrações médias de Cu, Sn e Zn associadas ao desgaste do disco. Em d), o elemento com maior concentração é o cobre, inclusive superando os níveis observados em c). Contudo, de acordo com a Figura 49, o ensaio representado em c) (BAD-b,r1) apresentou maior perda de material em comparação com d) (BBD-b,r1), demonstrando que a maior concentração de Cu em d) não se traduz necessariamente em maior desgaste geral.

#### 4.4.6 Amostras de graxa lubrificante em bronze TM-23 com rugosidade 2

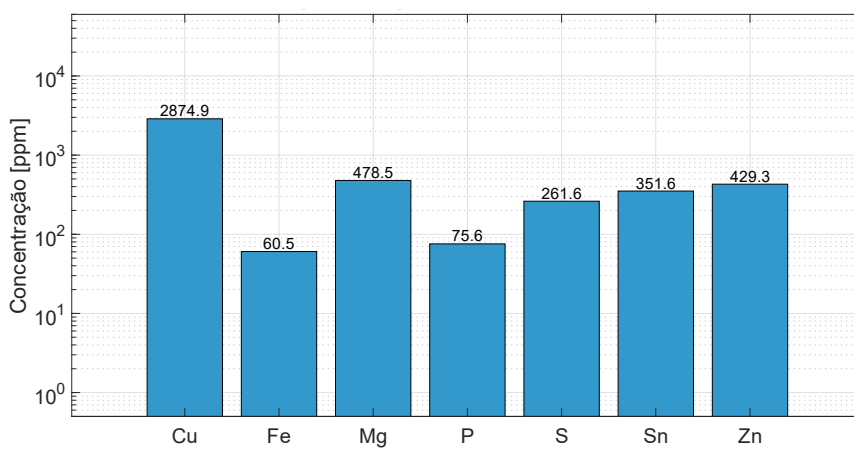
A Figura 58 mostra os gráficos de concentração de elementos nas amostras obtidas com a graxa lubrificante. Em a) AAA-b,r2; b) ABA-b,r2; c) AAD-b,r2 e d) ABD-b,r2.

Nos itens a) e b) da Figura 58, observa-se o seguinte, no caso a), as concentrações médias de Cu, Sn e Zn associadas ao desgaste do disco de bronze, além de uma presença notável de Fe, atribuível ao leve desgaste do pino de aço AISI 52100. No item b), as concentrações de Cu, Sn e Zn são consideravelmente maiores, indicando um desgaste mais intenso quando se utilizou graxa vegetal. Essa interpretação coincide com os resultados de perda de massa apresentados na Figura 50.

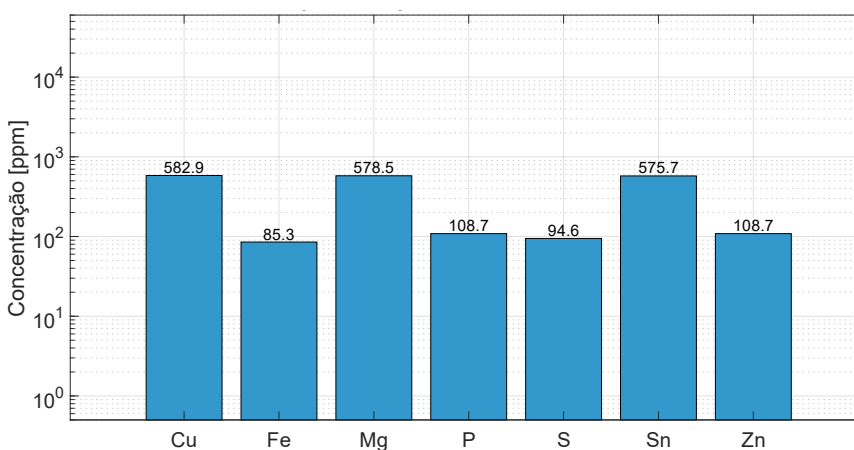
Figura 58 – Concentrações de elementos em amostras de graxa de bronze e r2



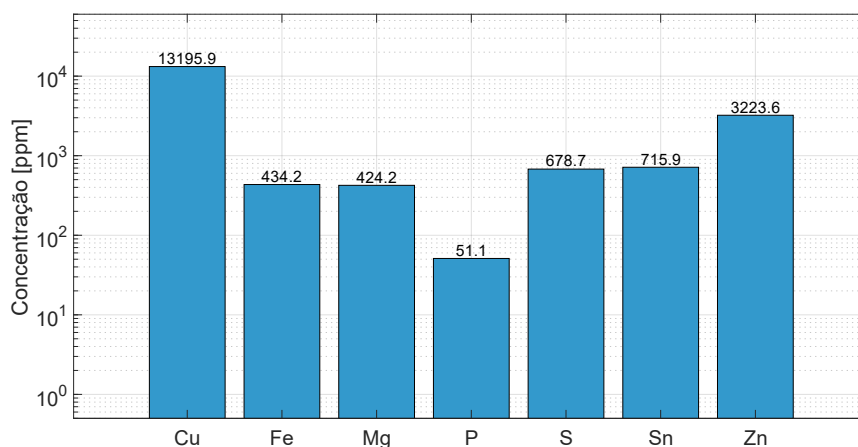
a) Ensaio AAA-b,r2.



b) Ensaio ABA-b,r2.



c) Ensaio AAD-b,r2.



d) Ensaio ABD-b,r2.

Fonte: Elaborado pelo autor.

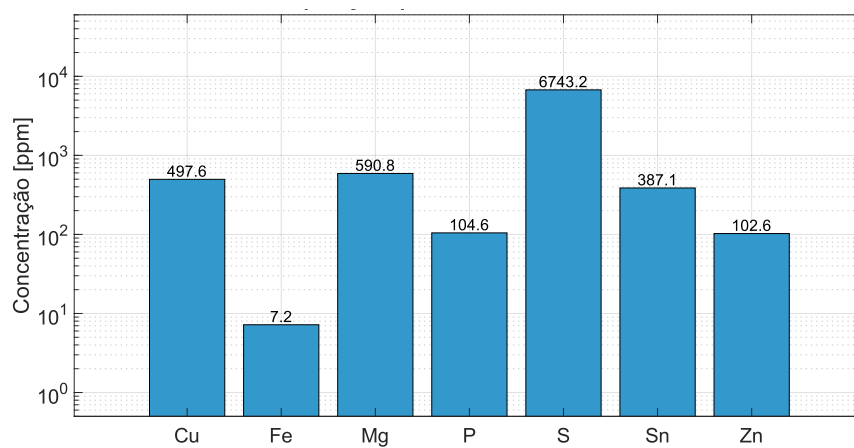
Na segunda parte da Figura 58, correspondente aos itens c) e d), a mesma tendência se mantém em relação aos elementos resultantes do desgaste do disco. As maiores concentrações de Cu, Sn e Zn aparecem no item d), indicando maior desgaste em comparação com o ensaio representado em c). Esse comportamento é consistente com a Figura 50, onde o ensaio ABD-b,r2 exibe uma taxa de desgaste maior.

#### 4.4.7 Amostras de óleo lubrificante em bronze TM-23 com rugosidade 2

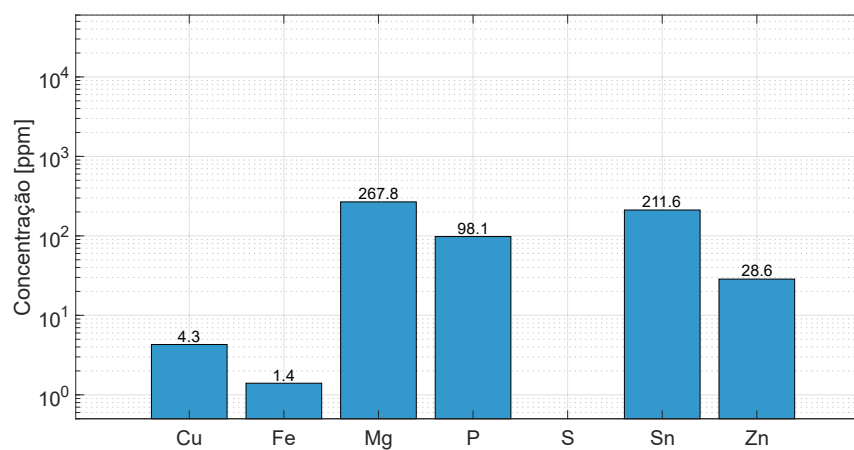
A Figura 59 mostra os gráficos de concentração de elementos nas amostras obtidas com o óleo lubrificante. Em a) BAA-b,r2; b) BBA-b,r2; c) BAD-b,r2 e d) BBD-b,r2.

Na Figura 59, o item a) mostra uma alta concentração de enxofre, característica do óleo mineral, juntamente com níveis mais baixos de Cu, Sn e Zn resultantes do desgaste do disco de bronze. No item b), as concentrações de Cu são mínimas, enquanto Sn e Zn aparecem em níveis mais elevados. Comparando os dois itens, fica evidente que as concentrações totais dos elementos são maiores em a), indicando um desgaste mais acentuado nesse ensaio. Essa interpretação é consistente com a perda de material mostrada na Figura 51.

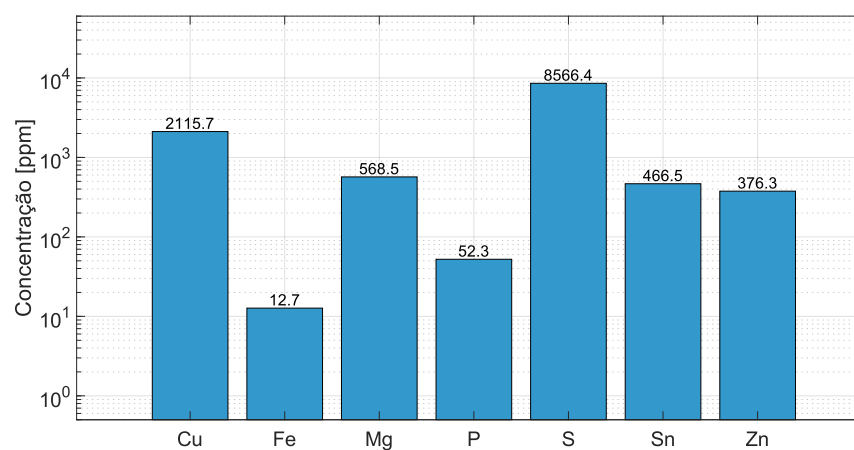
Figura 59 – Concentrações de elementos em amostras de óleo de bronze e r2



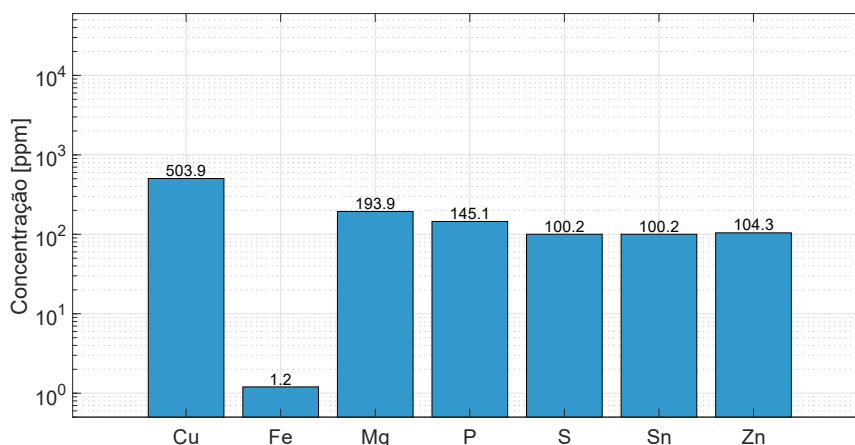
a) Ensaio BAA-b,r2.



b) Ensaio BBA-b,r2.



c) Ensaio BAD-b,r2.



d) Ensaio BBD-b,r2.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na segunda parte da Figura 59, o item c) exhibe o comportamento típico dos ensaios com óleo mineral, com alta concentração de enxofre e presença de Cu, Sn e Zn associados ao desgaste do disco. Em contraste, o item d) mostra o cobre como o único elemento proeminente, embora em níveis inferiores aos observados em c). Comparando ambos os ensaios, pode-se inferir que o desgaste foi maior quando o lubrificante mineral foi utilizado, o que está de acordo com a relação entre as concentrações dos elementos detectados e a taxa de desgaste ilustrada na Figura 51.

A análise geral por fluorescência de raios X (XRF) revela uma correlação direta entre as concentrações de elementos metálicos e o desgaste observado nos discos durante os ensaios tribológicos. Em sistemas de ferro fundido, os níveis de Fe, Mg e Zn aumentaram proporcionalmente ao desgaste, enquanto Cu, Sn e Zn predominaram em discos de bronze. Os lubrificantes minerais apresentaram consistentemente concentrações mais elevadas de S, refletindo sua composição básica, e, em vários casos, também mostraram níveis mais altos de elementos metálicos, indicando maior desgaste. Por outro lado, os lubrificantes à base de vegetais tenderam a gerar concentrações mais baixas de elementos de desgaste, exceto em condições específicas em que altas cargas ou instabilidade no regime de lubrificação aumentaram a remoção de material. Em conjunto, os resultados da XRF complementam as tendências observadas nos coeficientes de atrito e na perda de massa, confirmando a influência do tipo de lubrificante e do material do disco na severidade do desgaste.

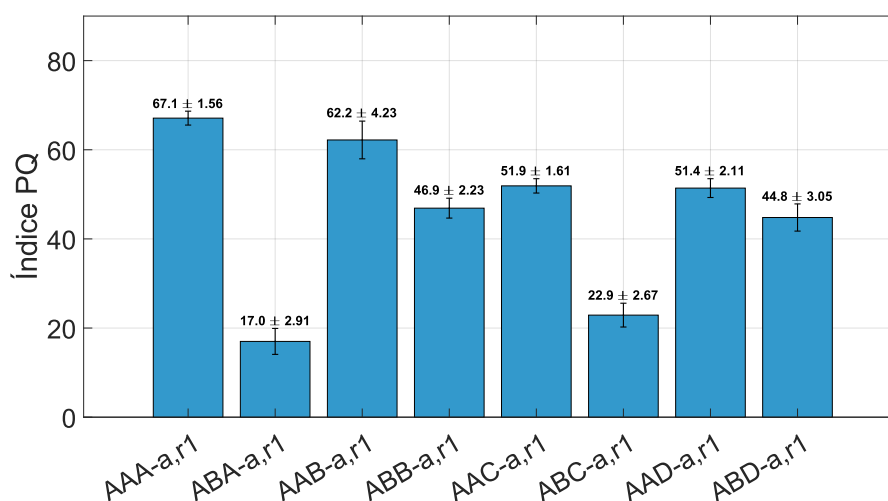
#### 4.5 PARTICLE QUANTIFICATION INDEX (P.Q.I.)

Esta análise, com foco no índice do contador de partículas (Índice P.Q.), busca fornecer uma perspectiva abrangente sobre a magnitude do desgaste gerado em ensaios realizados com graxas e óleos lubrificantes sob os diferentes parâmetros operacionais avaliados. Este índice constitui uma ferramenta complementar de diagnóstico que permite correlacionar a quantidade total de partículas ferrosas presentes no lubrificante com a severidade dos mecanismos de desgaste atuantes em cada configuração. De forma semelhante ao exposto nas seções anteriores, a análise começará com a interpretação dos resultados correspondentes às amostras de graxa lubrificante ensaiadas em discos de F.F.N. com rugosidade 1, avançando progressivamente para incluir o comportamento observado em óleos lubrificantes aplicados em discos de bronze com rugosidade 2.

##### 4.5.1 Índice P.Q. em amostras de graxa lubrificante em F.F.N. com rugosidade 1

A Figura 60 apresenta os valores obtidos dos índices PQ para os ensaios realizados nos discos F.F.N., tendo como agente lubrificante a graxa.

Figura 60 – P.Q.I. em amostras de graxa em F.F.N. com rugosidade 1



Fonte: Elaborado pelo autor.

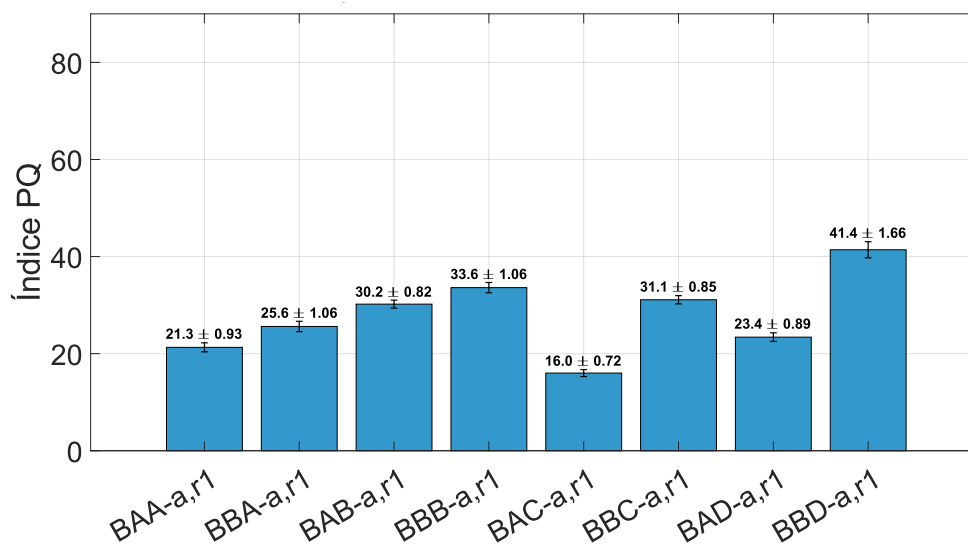
Como pode ser observado na Figura 60, os quatro primeiros valores do índice P.Q., correspondentes aos ensaios AAA-a,r1 a AAD-a,r1, refletem níveis de até 67 unidades quando graxa mineral foi utilizada como lubrificante. A comparação desses resultados com aqueles obtidos nas mesmas condições, porém utilizando graxa vegetal, demonstra uma redução

significativa no índice P.Q., indicando menor concentração de partículas ferrosas em suspensão e, portanto, menor taxa de desgaste. Essa tendência é corroborada pelos resultados apresentados na Figura 45, que também demonstram menor perda de massa nesses ensaios específicos.

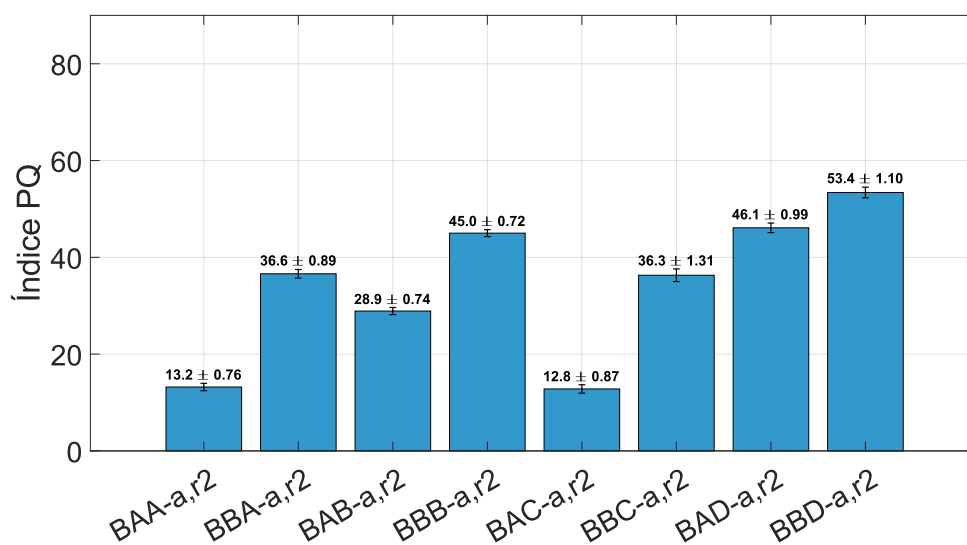
#### 4.5.2 Índice P.Q. em amostras de óleo lubrificante em F.F.N. com rugosidade 1 e 2

Considerando a Figura 61, é apresentada a análise realizada para os resultados dos índices PQ com óleos como agentes lubrificantes e com os discos F.F.N.

Figura 61 – P.Q.I. em amostras de óleo em F.F.N. com rugosidade 1 e 2



a) Ensaios com discos de rugosidade 1.



b) Ensaios com discos de rugosidade 2.

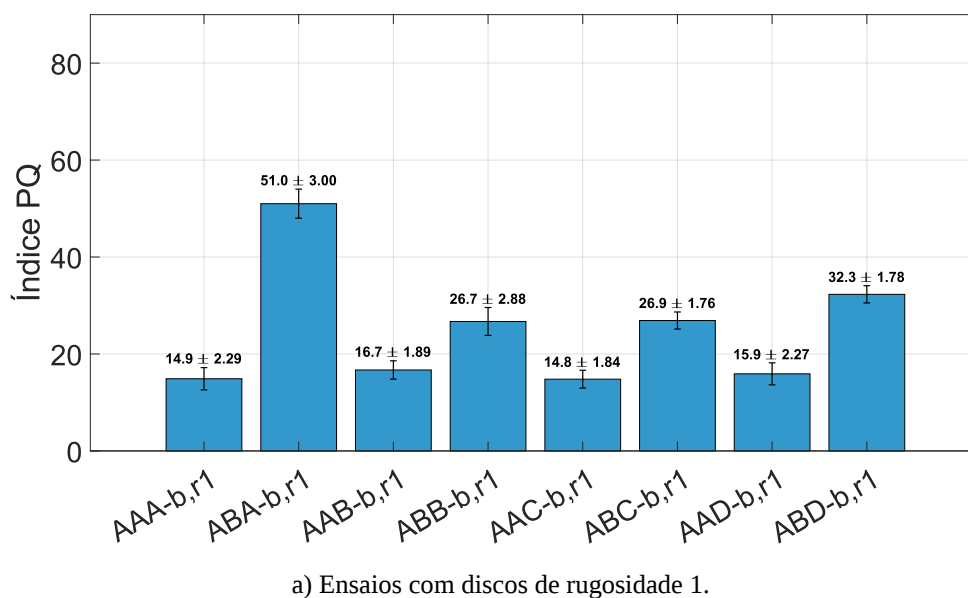
Fonte: Elaborado pelo autor.

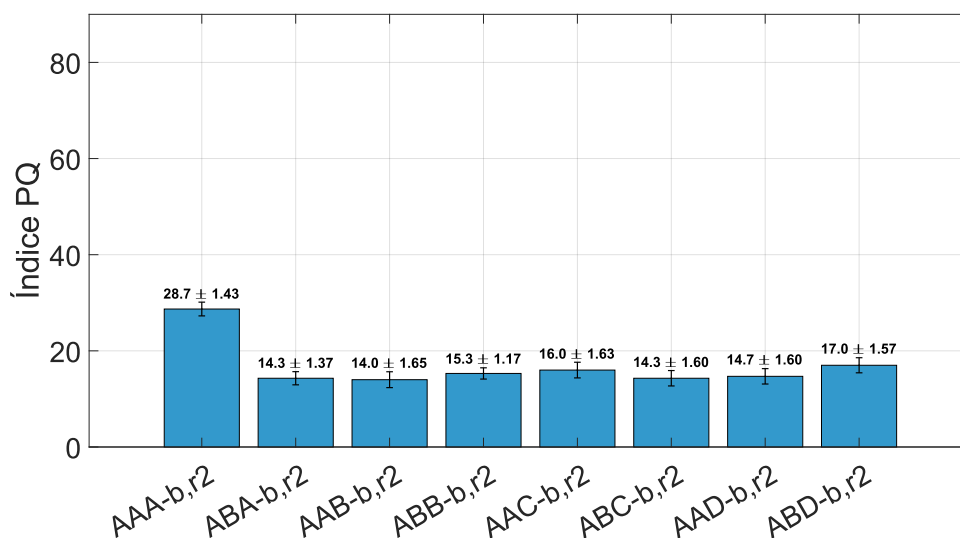
A Figura 61 apresenta os índices P.Q. obtidos nos ensaios com óleo mineral e vegetal. No item a), todos os oito ensaios mostram valores dentro de uma faixa moderada de concentração de partículas. No item b), esses níveis são excedidos na maioria dos ensaios, com cinco dos oito casos registrando índices superiores aos do item a), sugerindo um desgaste mais acentuado nos discos com rugosidade 2 em comparação com os de rugosidade 1. De uma perspectiva comparativa entre os lubrificantes, observa-se que o óleo vegetal tende a gerar concentrações de partículas mais elevadas em alguns ensaios; no entanto, essa tendência não é uniforme e depende do comportamento específico refletido nos resultados de desgaste mostrados nas Figura 46 e Figura 47.

#### 4.5.3 Índice P.Q. em amostras de graxa lubrificante em bronze com rugosidade 1 e 2

Agora, passa-se para o próximo elemento metálico testado com os lubrificantes, que é o bronze. A Figura 62 mostra os índices PQ dos diferentes ensaios realizados para ambas as rugosidades superficiais dos discos.

Figura 62 – P.Q.I. em amostras de graxa em bronze com rugosidade 1 e 2





b) Ensaios com discos de rugosidade 2.

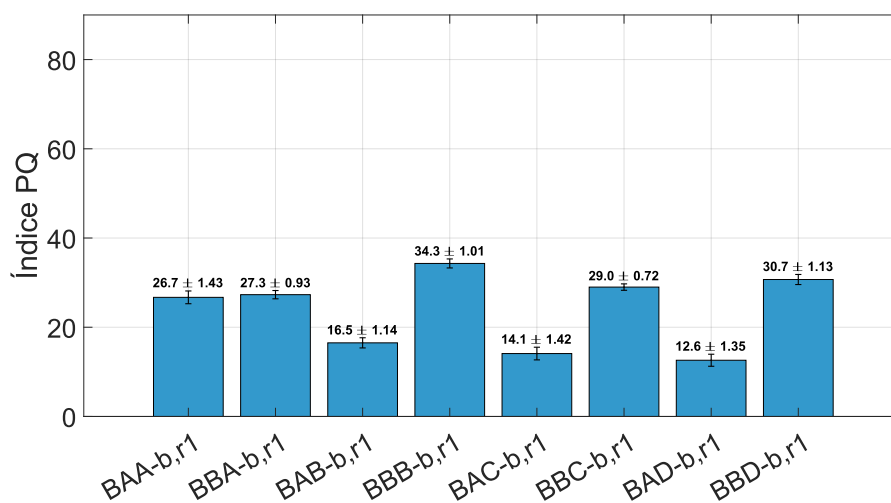
Fonte: Elaborado pelo autor.

Nesta seção, correspondente aos ensaios realizados com graxa mineral e vegetal em discos de bronze, a Figura 62 mostra níveis moderados de concentração de partículas de desgaste no item a), com exceção do ensaio ABA-b,r1, que registrou um índice P.Q. de 51; entretanto, de acordo com a Figura 48, este ensaio apresentou uma taxa de desgaste relativamente baixa. No item b), os valores do índice P.Q. permanecem em níveis baixos, indicando que os ensaios com discos de bronze de rugosidade 2 geraram menos partículas metálicas em comparação com os discos de rugosidade 1. Essa tendência é consistente com as taxas de desgaste observadas nas Figura 48 e Figura 50.

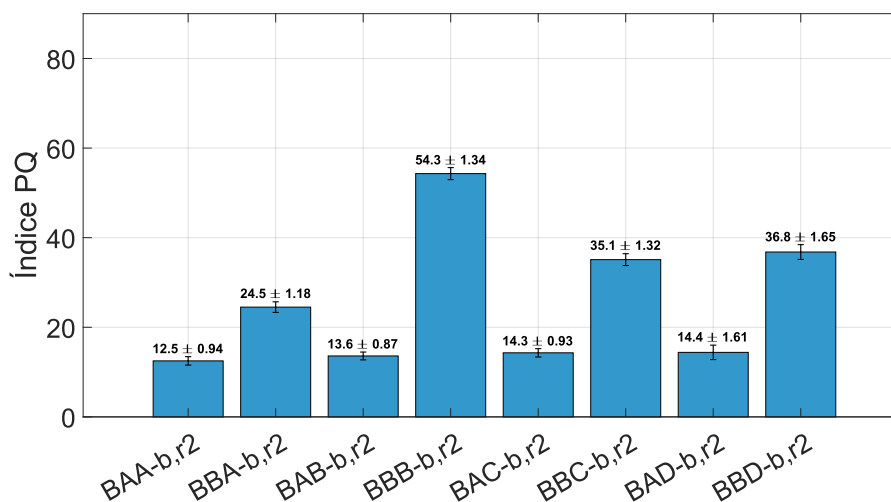
#### 4.5.4 Índice P.Q. em amostras de óleo lubrificante em bronze com rugosidade 1 e 2

Para concluir esta seção do índice PQ, os resultados obtidos nas amostras de óleo são mostrados na Figura 63.

Figura 63 – P.Q.I. em amostras de óleo em bronze com rugosidade 1 e 2



a) Ensaios com discos de rugosidade 1.



b) Ensaios com discos de rugosidade 2.

Fonte: Elaborado pelo autor.

No item a) da Figura 63, cinco dos oito ensaios mostram níveis moderados de concentração de partículas de desgaste, enquanto os três restantes permanecem em níveis baixos do índice P.Q. No item b), a maioria dos ensaios, cinco de oito, apresenta baixos níveis de concentração de partículas, sugerindo que os discos com rugosidade 1 geraram maior desgaste em comparação com os discos com rugosidade 2. Essa interpretação está de acordo com as taxas de desgaste observadas nas Figura 49 e Figura 51.

A análise do índice PQ demonstrou uma clara correlação entre a quantidade de partículas ferrosas geradas e as condições tribológicas impostas. Em geral, uma maior rugosidade superficial (r2) intensificou o desgaste, refletindo-se em valores mais elevados do índice PQ. Graxas e óleos minerais tenderam a gerar menos partículas do que seus equivalentes

de origem vegetal em condições específicas, embora lubrificantes de origem vegetal, especialmente o óleo de mamona, tenham demonstrado desempenho tribológico competitivo, com baixo desgaste na maioria dos ensaios.

#### 4.6 FERROGRAFIA ANALÍTICA

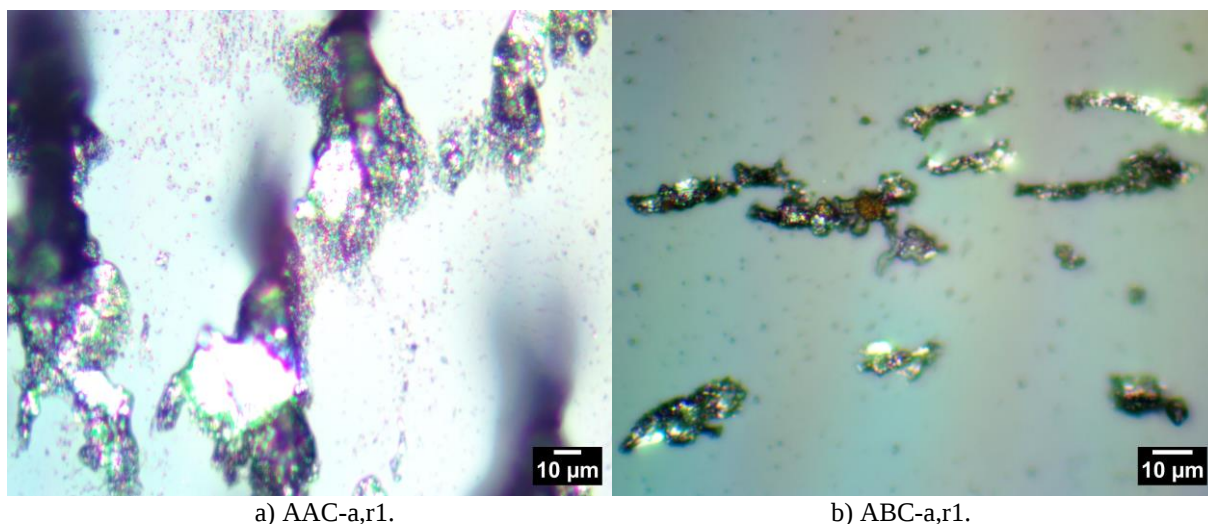
Para esta seção, foi utilizada a ferrografia analítica, ferramenta amplamente utilizada na análise de partículas de desgaste. Este método permitiu a observação direta e a classificação morfológica das partículas presentes nas amostras, contribuindo decisivamente para a identificação dos mecanismos de desgaste predominantes nos ensaios realizados com o tribômetro.

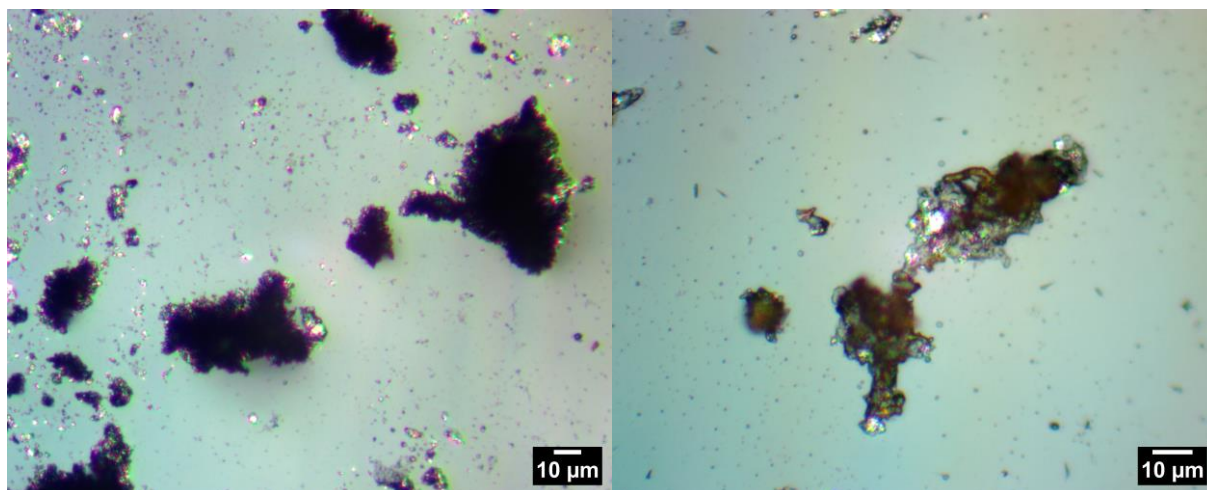
A seleção das amostras seguiu a lógica previamente estabelecida na análise de desgaste, priorizando aquelas provenientes de condições que registraram as maiores taxas de desgaste e, em contrapartida, também de ensaios com baixo coeficiente de atrito. Quando integrada a resultados anteriores, como perda de massa, índice PQ e espectrometria de raios X, a ferrografia analítica proporcionou uma visão mais completa e qualitativa do comportamento tribológico dos pares lubrificante/material testados, conforme descrito a seguir.

##### 4.6.1 Partículas de F.F.N. com rugosidade 1 e com graxas lubrificantes

A Figura 64 mostra as partículas encontradas nas amostras de: a) AAC-a,r1; b) ABC-a,r1; c) AAD-a,r1 e d) ABD-a,r1.

Figura 64 – Partículas de desgaste em F.F.N. r1 com graxa lubrificante





c) AAD-a,r1.

d) ABD-a,r1.

Fonte: Elaborado pelo autor.

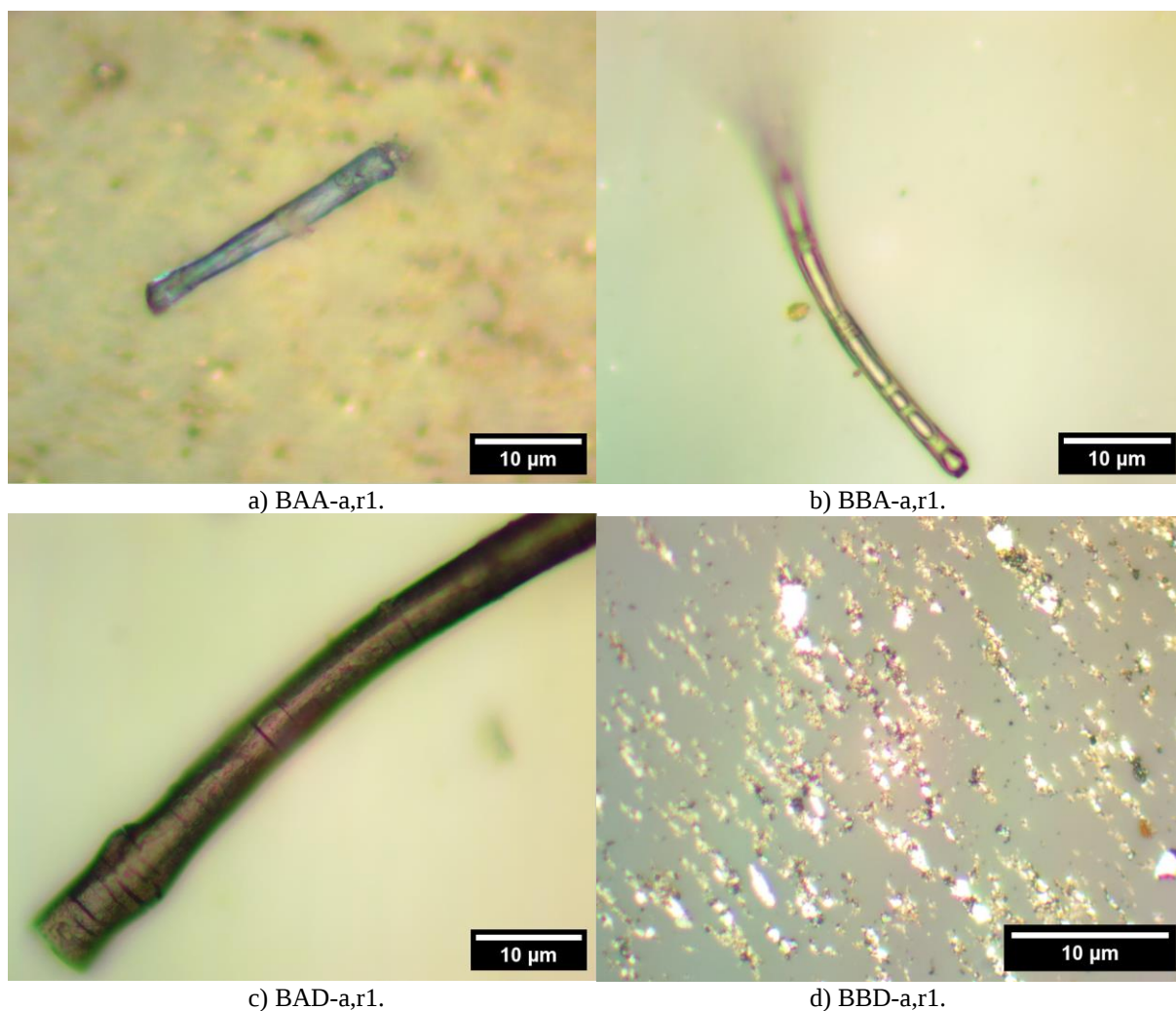
A Figura 64 apresenta imagens representativas de partículas coletadas em diferentes ensaios com graxas lubrificantes aplicadas em superfícies de ferro fundido nodular com rugosidade 1. No item a) correspondente ao ensaio AAC-a,r1, identifica-se uma partícula acinzentada, atribuída ao substrato de ferro fundido. Sua morfologia alongada com bordas irregulares sugere que foi gerada predominantemente por um mecanismo de desgaste adesivo, característico de tensões de cisalhamento entre superfícies em contato prolongado. Para o item b) do ensaio ABC-a,r1; identifica-se mesmo partículas acinzentadas e com oxido, atribuídas ao desgaste do disco de ferro fundido. A morfologia alongada com bordas irregulares sugere que foi gerada por mecanismo de desgaste adesivo.

No item c) do ensaio AAD-a,r1; observam-se partículas acinzentadas com presença de óxidos escuros. Esse padrão é típico de desgaste por lubrificação intermitente ou insuficiente, onde picos de atrito geram superaquecimento e subsequente formação de camadas oxidadas. No item d) correspondente ao ensaio ABD-a,r1, são identificadas partículas da cor prata e oxido, alongadas e com contornos irregulares, características compatíveis com desgaste adesivo, reforçando a hipótese de contato metálico sustentado entre as superfícies.

#### 4.6.2 Partículas de F.F.N. com rugosidade 1 e com óleos lubrificantes

A Figura 65 mostra partículas dos seguintes ensaios: a) BAA-a,r1; b) BBA-a,r1; c) BAD-a,r1 e d) BBD-a,r1.

Figura 65 – Partículas de desgaste em F.F.N. r1 com óleo lubrificante



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 65 mostra partículas representativas extraídas de amostras lubrificadas com óleo mineral e vegetal, todas obtidas a partir de ensaios realizados em discos de ferro fundido com rugosidade 1. No item a) correspondente ao ensaio BAA-a,r1, observa-se uma partícula alongada e com bordas definidas, com características típicas de formação por desgaste abrasivo, possivelmente produto da ação de partículas duras sobre a superfície metálica. No item b) do ensaio BBA-a,r1, identifica-se uma morfologia semelhante à anterior uma partícula alongada e pontiaguda, gerada por desgaste abrasivo contínuo, gerado por micro cortes na interface tribológica.

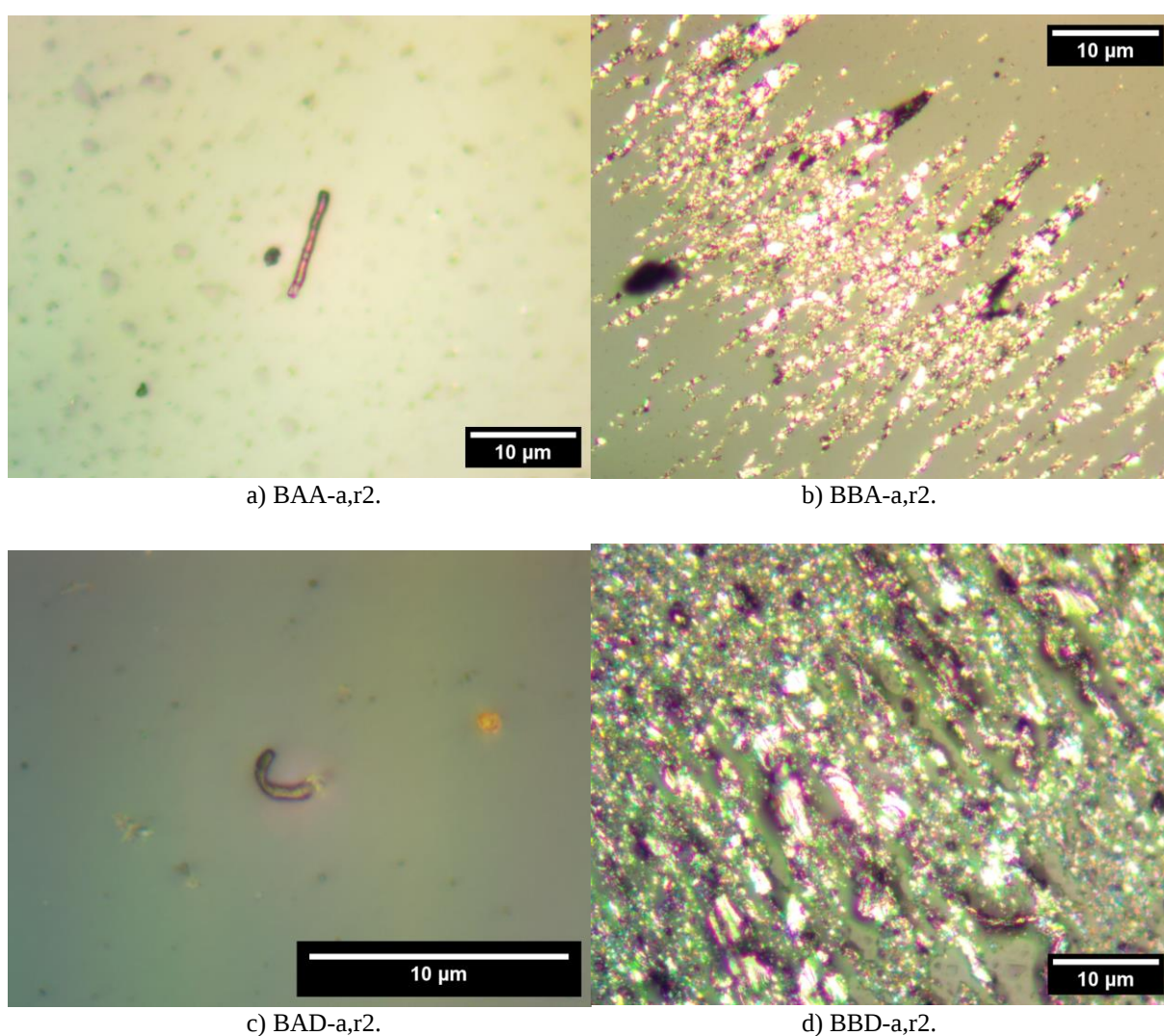
No item c) correspondente ao ensaio BAD-a,r1 detecta-se uma partícula fina, contínua e altamente alongada, compatível com desgaste abrasivo em regime moderado, com fragmentação mínima. Por fim, no item d) do ensaio BBD-a,r1 são identificadas múltiplas

partículas de ferro alinhadas, indicativas de desgaste normal ou leve, onde o processo de remoção de material ocorre regularmente, sem manifestações severas de outros mecanismos.

#### 4.6.3 Partículas de F.F.N. com rugosidade 2 e com óleos lubrificantes

A Figura 66 mostra as partículas encontradas nas amostras de: a) BAA-a,r2; b) BBA-a,r2; c) BAD-a,r2 e d) BBD-a,r2.

Figura 66 – Partículas de desgaste em F.F.N. r2 com óleo lubrificante



Fonte: Elaborado pelo autor.

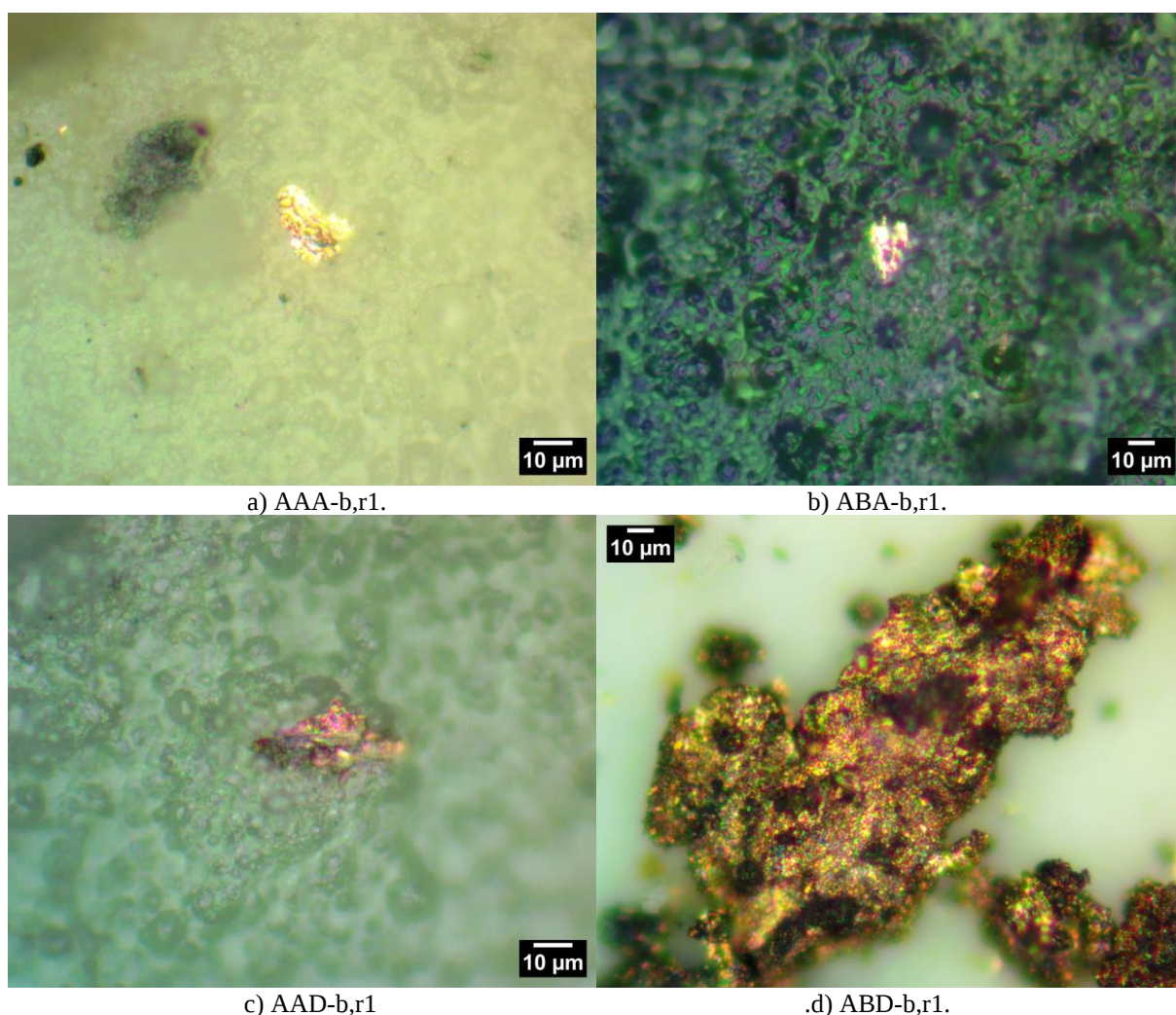
A Figura 66 mostra partículas provenientes de amostras lubrificadas com óleo vegetal e mineral, obtidas em ensaios realizados em discos de ferro fundido com rugosidade superficial r2. No item a) do ensaio BAA-a,r2 observa-se uma partícula alongada e com bordas definidas, com características típicas de formação por desgaste abrasivo. No item b) do ensaio BBA-a,r2

são identificadas partículas ferrosas alinhadas, típicas de desgaste normal, geradas em condições de deslizamento estáveis e sem falhas críticas de lubrificação. No item c) correspondente ao ensaio BAD-a,r2 observa-se uma partícula curva com contornos bem definidos, característica de um mecanismo de desgaste abrasivo, possivelmente induzido por asperezas ativas ou contaminantes duros presentes na interface. Por fim, no item d) BBD-a,r2, também são percebidas partículas alinhadas, associadas a desgaste leve ou normal, consistente com um regime tribológico moderado durante o ensaio.

#### 4.6.4 Partículas de bronze com rugosidade 1 e com graxas lubrificantes

A Figura 67 mostra partículas de desgaste dos seguintes ensaios: a) AAA-b,r1; b) ABA-b,r1; c) AAD-b,r1 e d) ABD-b,r1.

Figura 67 – Partículas de desgaste em bronze r1 com graxa lubrificante



Fonte: Elaborado pelo autor.

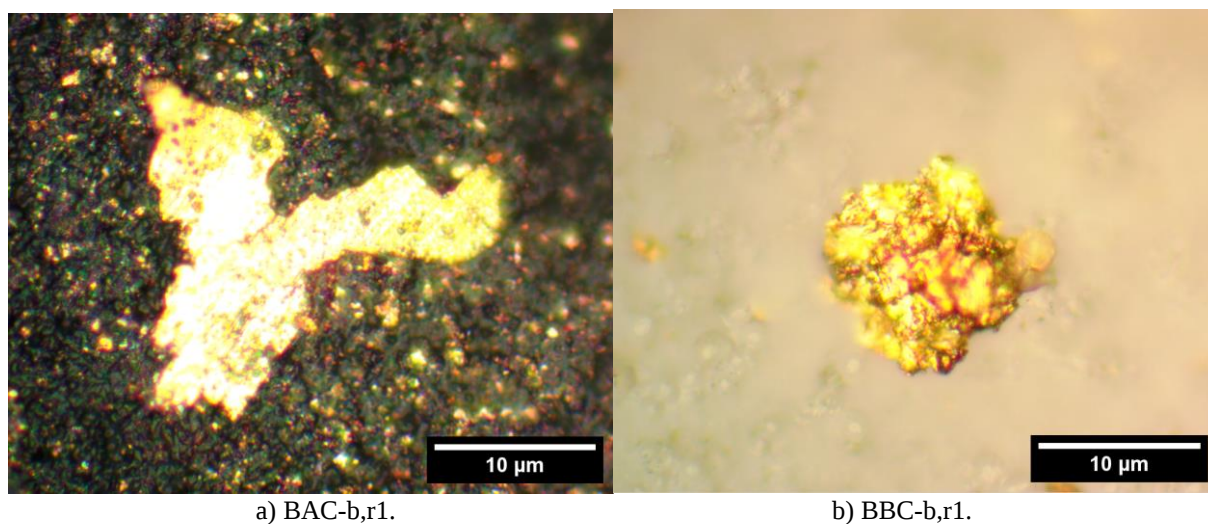
A Figura 67 mostra partículas extraídas de amostras obtidas em ensaios realizados com discos de bronze com graxa mineral e vegetal. Nos itens a) AAA-b,r1 e c) AAD-b,r1, são identificadas partículas de formato irregular e levemente alongadas, típicas de desgaste adesivo severo sob altas cargas. No item c), também é observada a presença de óxidos avermelhados na superfície, indicando oxidação por contato com oxigênio e/ou umidade, refletindo condições de lubrificação intermitentes ou deterioradas.

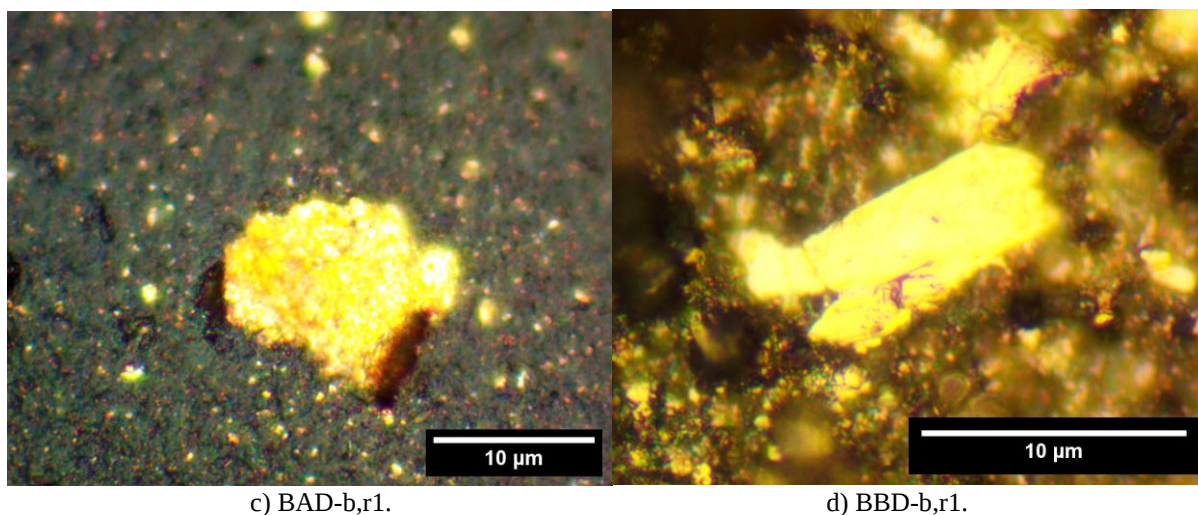
Nos itens b) ABA-b,r1 e d) ABD-b,r1, observam-se partículas com bordas irregulares e cortantes, uma delas com formato circular e a outra formato alongado, características atribuíveis à fadiga severa ou “*spalling*”, mecanismo que ocorre em condições de fadiga superficial induzida por cargas cíclicas.

#### 4.6.5 Partículas de bronze com rugosidade 1 e com óleos lubrificantes

A Figura 68 mostra as partículas encontradas nas amostras de: a) BAC-b,r1; b) BBC-b,r1; c) BAD-b,r1 e d) BBD-b,r1.

Figura 68 – Partículas de desgaste em bronze r1 com óleo lubrificante





c) BAD-b,r1.

d) BBD-b,r1.

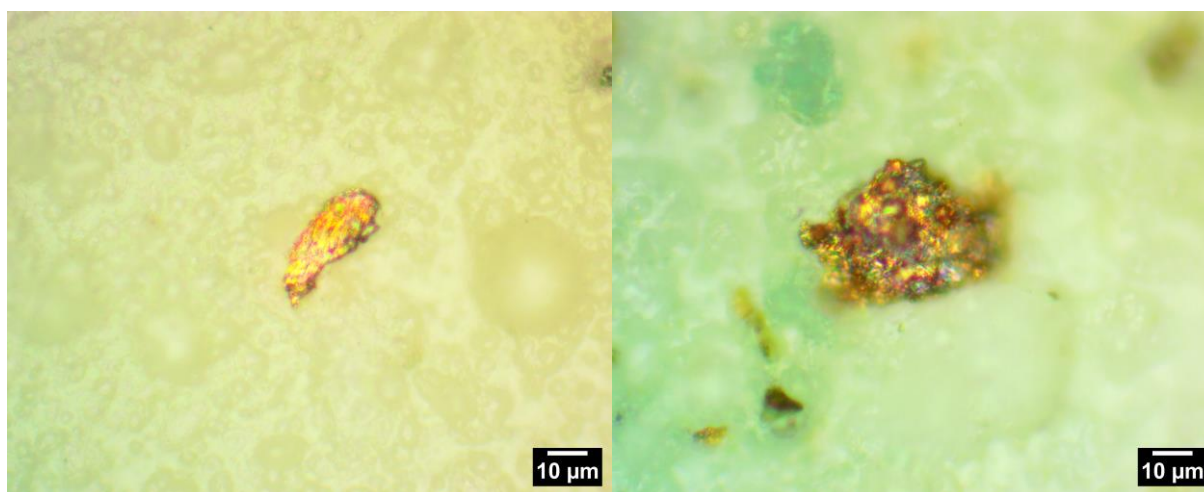
Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 68 correspondente aos ensaios com óleos mineral e vegetal e discos de bronze sob rugosidade r1, observam-se partículas com bordas irregulares e formato circular nos itens, b) BBC-b,r1 e c) BAD-b,r1, o que indica um mecanismo de desgaste por fadiga severa, um mecanismo comum em condições de fadiga superficial. Vale ressaltar que nos itens a) e b) são evidentes múltiplas partículas distribuídas na periferia das partículas principais, essas partículas principais com formato alongado y bordas irregulares indicam um desgaste adesivo severo, o que sugere desgaste mais severo em comparação ao item c).

#### 4.6.6 Partículas de bronze com rugosidade 2 e com graxas lubrificantes

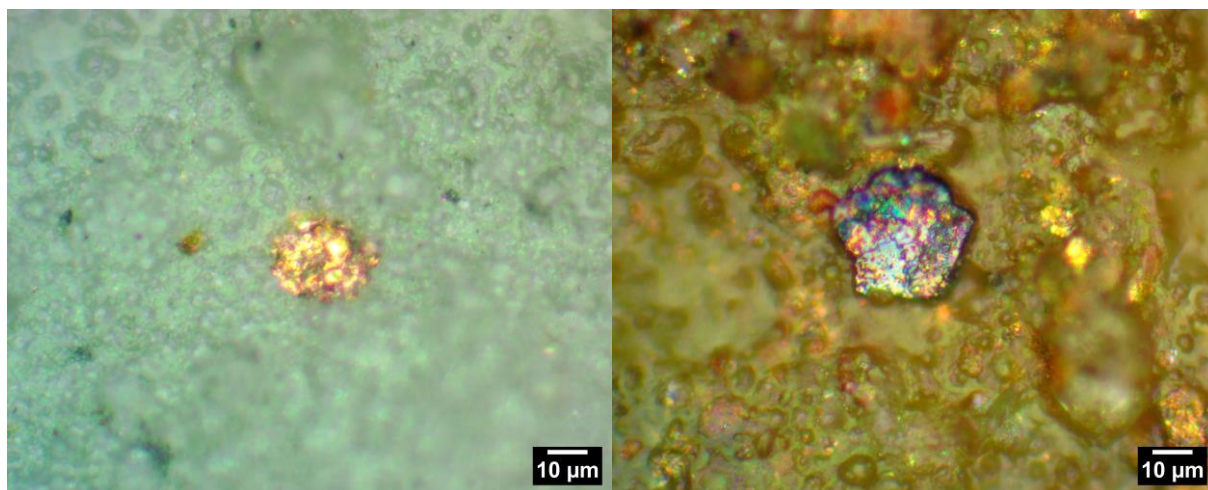
A Figura 69 mostra partículas de desgaste dos seguintes ensaios: a) AAA-b,r2; b) ABA-b,r2; c) AAD-b,r2 e d) ABD-b,r2.

Figura 69 – Partículas de desgaste em bronze r2 com graxa lubrificante



a) AAA-b,r2.

b) ABA-b,r2.



c) AAD-b,r2.

d) ABD-b,r2.

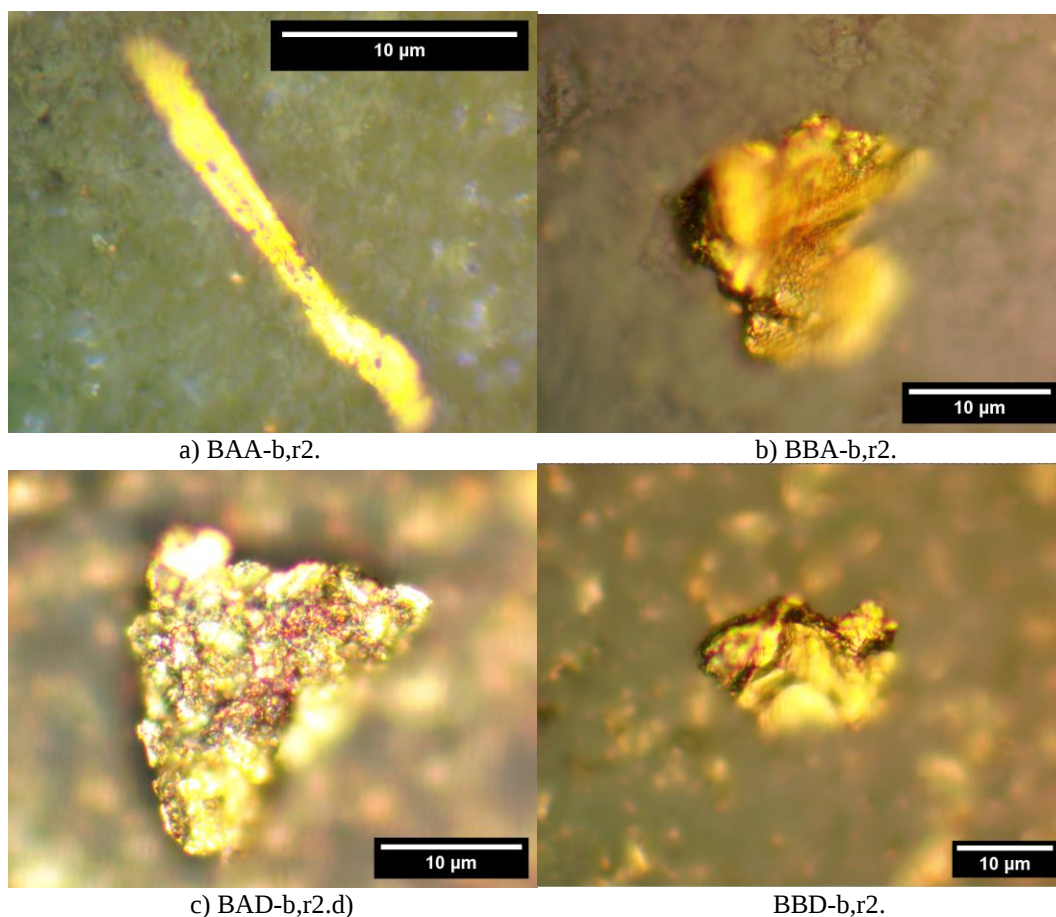
Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 69 as partículas observadas apresentam formato circular e bordas irregulares, características típicas de desgaste por fadiga ou “*spalling*”, com exceção do item a), em que a partícula é alongada. Na seção a) AAA-b,r2, a partícula apresenta variações da cor em sua superfície, sugerindo uma condição de alto atrito de rolamento, com geração de altas temperaturas durante sua formação. Fenômeno semelhante é identificado no item d) ABD-b,r2, indicando condições tribológicas críticas. Em relação ao item b) ABA-b,r2, observam-se manchas avermelhadas que indicam processos de oxidação incipientes, provavelmente devido à exposição ao oxigênio ou à umidade durante ou após o ensaio.

#### 4.6.7 Partículas de bronze com rugosidade 2 e com óleos lubrificantes

Para concluir esta seção de ferrografia analítica, as partículas encontradas nos ensaios são mostradas na Figura 70: a) BAA-b,r2; b) BBA-b,r2; c) BAD-b,r2 e d) BBD-b,r2.

Figura 70 – Partículas de desgaste em bronze r2 com óleo lubrificante



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 70 as partículas dos itens b), c) e d) apresentam bordas irregulares e formas circulares, confirmando a predominância do mecanismo de desgaste por fadiga severa nesses ensaios. Diferentemente das partículas observadas na figura anterior, não há sinais de oxidação evidentes neste caso, indicando condições menos agressivas em termos de exposição a oxigênio ou umidade. No item b) do ensaio BBA-b,r2, identifica-se uma partícula com morfologia alongada e pontiaguda, gerada por desgaste abrasivo contínuo e por micro cortes na interface tribológica.

A ferrografia analítica identificou claramente os mecanismos de desgaste predominantes em cada condição do ensaio. Partículas associadas a desgaste adesivo, abrasivo e por fadiga foram observadas principalmente, com variações morfológicas e superficiais refletindo a influência direta do lubrificante, da rugosidade da superfície e da carga aplicada. A presença de óxidos, partículas alinhadas e estruturas com bordas irregulares forneceu evidências concretas das condições tribológicas locais e sua evolução durante os ensaios. Juntamente com os dados quantitativos anteriores, essa técnica consolidou uma interpretação mais robusta dos modos de falha envolvidos.

## 5 CONCLUSÕES

Ao longo desta pesquisa, o estudo tribológico de diferentes lubrificantes, minerais e vegetais foi aprofundado, utilizando ferramentas analíticas avançadas. A tribologia, como ciência aplicada, mostrou-se fundamental não apenas para a compreensão dos mecanismos de desgaste, mas também para a proposição de soluções voltadas à manutenção preventiva e à melhoria da eficiência operacional em sistemas mecânicos.

Em consonância com os objetivos propostos, os lubrificantes de base vegetal como a graxa à base de soja e o óleo de mamona, apresentaram propriedades físico-químicas comparáveis, e até superiores, às suas contrapartes minerais. A análise do coeficiente de atrito revelou que tanto a graxa vegetal a base de óleo de soja quanto o óleo de mamona alcançaram reduções significativas de atrito de 17,1% e 18,7%, respectivamente, posicionando-os como opções viáveis para aplicações que exigem baixo atrito. Além disso, o óleo de mamona apresentou excelente comportamento tribológico, reduzindo a taxa de desgaste em até 7% em condições de deslizamento.

No entanto, esse desempenho não foi uniforme em todos os casos. A graxa vegetal à base de óleo de soja apresentou um aumento considerável na taxa de desgaste em discos de ferro fundido, destacando a necessidade de seleção adequada das condições de operação e compatibilidade entre lubrificante e material; além da necessidade de a graxa de soja ser aprimorada com aditivos de extrema pressão e antidesgaste.

O índice de contagem de partículas (PQ) e a ferrografia analítica permitiram diferenciar o desempenho entre a graxa vegetal de soja e a graxa mineral. Em condições mais severas, a graxa vegetal de soja apresentou valores de PQ mais elevados em diversos ensaios e maior presença de partículas associadas ao desgaste por adesão e à abrasão localizada, sugerindo menor eficácia na separação superficial sustentada. Em contrapartida, a graxa mineral tendeu a produzir morfologias compatíveis com desgaste moderado, com menor incidência de partículas severas. As diferenças observadas no tamanho, forma e grau de oxidação dos detritos reforçaram a relação entre a estabilidade da película lubrificante e o controle do desgaste.

Em resumo, os resultados desta pesquisa corroboram o potencial tribo técnico de lubrificantes à base de óleo de soja como substitutos viáveis para lubrificantes derivados de lubrificantes fósseis. No entanto, a validação completa de graxas formuladas a partir de óleo de soja requer uma caracterização multidimensional que transcenda a macro escala. Embora a análise cinemática e a quantificação do desgaste por meio de XRF e PQA forneçam uma perspectiva fenomenológica, é imprescindível aprofundar o estudo da tribo química da

interface. A transição para uma engenharia de lubrificação sustentável exige a elucidação dos mecanismos de interação molecular entre ésteres de soja e substratos metálicos sob condições críticas de carga.

## 5.1 TRABALHOS FUTUROS

Abaixo estão algumas recomendações que podem melhorar ou complementar este trabalho:

- Apesar da robustez dos dados obtidos por fluorescência de raios X (XRF) e do monitoramento da severidade do desgaste por análise quantitativa de partículas (PQA), a complexidade das interfaces tribológicas em biolubrificantes abre novas perspectivas de pesquisa. Para consolidar a viabilidade da graxa à base de óleo de soja em ambientes industriais, propõe-se a seguinte abordagem avançada de caracterização:
  - Análise tribo-química por XPS (Espectroscopia Fotoeletrônica de Raios X), esta técnica é recomendada para caracterizar a natureza química do tribo-filme formado. Como os ácidos graxos da soja possuem grupos funcionais polares, a XPS é essencial para distinguir entre mecanismos de adsorção, identificando a formação de sabões ou óxidos metálicos específicos na trilha de desgaste.
  - Microscopia Eletrônica de Varredura e Espectroscopia de Dispersão de Energia (MEV/EDS), complementando a microscopia óptica realizada, o uso da MEV permitirá uma caracterização topográfica de alta resolução para identificar modos de falha específicos, como adesão severa, enquanto a EDS permitirá o mapeamento da transferência de elementos na zona de contato.
  - Avaliação da Estabilidade Dinâmica e Térmica (TGA/DSC), é imprescindível determinar os limites de operação da graxa utilizando Análise Termogravimétrica (TGA) e Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC). Essas análises permitirão estabelecer a temperatura de indução de oxidação (OIT), um parâmetro crítico para lubrificantes à base de vegetais devido à sua suscetibilidade à degradação termo-oxidativa.
- Otimizar a formulação de lubrificantes de origem vegetal, especialmente graxas, incorporando aditivos antioxidantes, antidesgaste e modificadores de viscosidade que melhoram sua estabilidade térmica e comportamento de desgaste sob condições severas.
- Aplicar modelos de simulação tribológica computacional (como métodos de elementos finitos ou dinâmica) para prever o comportamento de formulações antes de ensaios físicos, otimizando tempo e recursos.

- Realizar ensaios que simulem condições operacionais reais, incluindo ciclos térmicos, cargas variáveis e a presença de contaminantes (água, poeira, produtos de oxidação), para determinar a durabilidade e o desempenho dos biolubrificantes.

## REFERÊNCIAS

- ABOULKHAIR, N. T. *et al.* Improving the fatigue behaviour of a selectively laser melted aluminium alloy: Influence of heat treatment and surface quality. **Materials & Design**, London, v. 104, p. 174–182, ago. 2016. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.05.041>.
- ADHVARYU, A.; ERHAN, S. Z.; PEREZ, J. M. Tribological studies of thermally and chemically modified vegetable oils for use as environmentally friendly lubricants. **Wear**, Amsterdam, v. 257, n. 3–4, p. 359–367, ago. 2004a. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.wear.2004.01.005>.
- ADHVARYU, A.; ERHAN, S. Z.; PEREZ, J. M. Preparation of soybean oil-based greases: Effect of composition and structure on physical properties. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Washington, v. 52, n. 21, p. 6456–6459, 20 out. 2004b. DOI: <http://doi.org/10.1021/jf049888r>.
- AFFATATO, S.; RUGGIERO, A.; MEROLA, M. Advanced biomaterials in hip joint arthroplasty. A review on polymer and ceramics composites as alternative bearings. **Composites Part B: Engineering**, Oxford, v. 83, p. 276–283, dez. 2015. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.07.019>.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D217**: Standard test methods for cone penetration of lubricating grease. Pensilvânia, EUA: ASTM, 2003.
- ANDERSON, D. N.; HUBERT, C. J.; JOHNSON, J. H. Advances in quantitative analytical ferrography and the evaluation of a high gradient magnetic separator for the study of diesel engine wear. **Wear**, Amsterdam, v. 90, n. 2, p. 297–333, out. 1983. DOI: [http://doi.org/10.1016/0043-1648\(83\)90188-6](http://doi.org/10.1016/0043-1648(83)90188-6).
- ANTONIOSI, N. R. *et al.* **Estólios, ésteres e éteres de ácidos graxos alquilados obtidos a partir de matérias-primas graxas**. Depositante: Nelson Roberto Antoniosi Filho. BR10201600686. Depósito: 29/03/2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8650**: Emprego de ferro fundido nodular para produtos automotivos. 2. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.
- ATABANI, A. E. *et al.* Non-edible vegetable oils: A critical evaluation of oil extraction, fatty acid compositions, biodiesel production, characteristics, engine performance and emissions production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Oxford, v. 18, p. 211–245, 2013. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.rser.2012.10.013>.
- BANKOVIĆ-ILIĆ, I. B. *et al.* Waste animal fats as feedstocks for biodiesel production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Oxford, v. 32, p. 238–254, abr. 2014. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.038>.
- BARBERA, E. *et al.* Recent developments in synthesizing biolubricants: a review. **Biomass Conversion and Biorefinery**, Heidelberg, v. 14, n. 3, p. 2867–2887, 1 fev. 2024. DOI: <http://doi.org/10.1007/s13399-022-02438-9>.

BHAT, J.; BHAPKAR, U.; DESAI, M. Condition based predictive maintenance of worm gearbox using DR ferrography. **Materials Today: Proceedings**, Oxford, v. 52, p. 2210–2212, 2022. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.07.353>.

BILAL, S. Production of biolubricant from Jatropha curcas seed oil. **Journal of Chemical Engineering and Materials Science**, Sapele, v. 4, n. 6, p. 72–79, 30 set. 2013. DOI: <http://doi.org/10.5897/jcems2013.0164>.

BOWEN, R. *et al.* Ferrography. **Tribology International**, Oxford, v. 9, n. 3, p. 109–115, jun. 1976. DOI: [http://doi.org/10.1016/0301-679X\(76\)90033-5](http://doi.org/10.1016/0301-679X(76)90033-5).

BRISCOE, B. Wear of polymers: an essay on fundamental aspects. **Tribology International**, Oxford, v. 14, n. 4, p. 231–243, ago. 1981. DOI: [http://doi.org/10.1016/0301-679X\(81\)90050-5](http://doi.org/10.1016/0301-679X(81)90050-5).

BUCKLEY, D. H.; JOHNSON, R. L. The influence of crystal structure and some properties of hexagonal metals on friction and adhesion. **Wear**, Amsterdam, v. 11, n. 6, p. 405–419, jun. 1968. DOI: [http://doi.org/10.1016/0043-1648\(68\)90550-4](http://doi.org/10.1016/0043-1648(68)90550-4).

BUDINSKI, K. G. Adhesive transfer to abrasive particles in abrasion testing. **Wear**, Amsterdam, v. 271, n. 9–10, p. 1258–1263, jul. 2011. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.wear.2010.11.036>.

CAO, H.; KHAN, Z.; MENG, Y. Comparison of rolling contact fatigue life between elastohydrodynamic lubricated point contacts pre and post running-in treatment. **Tribology International**, Oxford, v. 144, p. 106089, abr. 2020. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.106089>.

CECILIA, J. A. *et al.* An overview of the biolubricant production process: Challenges and future perspectives. **Processes**, Basel, v. 8, n. 3, 1 mar. 2020. DOI: <http://doi.org/10.3390/pr8030257>.

CIULLI, E. Tribology and Industry: From the Origins to 4.0. **Frontiers in Mechanical Engineering**, Lausanne, v. 5, 2019. DOI: <http://doi.org/10.3389/fmech.2019.00055>.

DAVIM, J. P. **Tribology for engineers: A Practical Guide**. 1. ed. [S.l.]: Elsevier, 2011.

DAVIS, G. H. B.; LAPEYROUSE, M.; DEAN, E. W. Applying Viscosity Index to Solution of Lubricating Problems. **Oil and Gas Journal**, v. 30, n. 46, p. 92, 1932.

DEAN, E. W.; DAVIS, G. H. B. Viscosity variations of oils with temperature. **Chemical and Metallurgical Engineering**, Rockville, v. 36, p. 618–629, 1929.

DIOMIDIS, N. *et al.* Tribocorrosion of stainless steel in sulfuric acid: Identification of corrosion–wear components and effect of contact area. **Wear**, Amsterdam, v. 269, n. 1–2, p. 93–103, maio 2010. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.wear.2010.03.010>.

DONG, Z. *et al.* Review of the Modeling Methods of Bucket Tooth Wear for Construction Machinery. **Lubricants**, v. 11, n. 6, p. 253, 8 jun. 2023. DOI: <http://doi.org/10.3390/lubricants11060253>.

DOWSON, D.; HAMROCK, B. J. **History of ball bearings**. NASA-TM-81689. USA, 1981.

FINDIK, F. Latest progress on tribological properties of industrial materials. **Materials and Design**, London, v. 57, p. 218–244, 2014. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.12.028>.

GALVÃO, C. F. **Instrumentação e validação de um equipamento pino sobre o disco**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, São Paulo, 2019. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/entities/publication/19c5313a-a298-48f9-8ac9-fe9822339d47>. Acesso em: 9 jul. 2025.

GHOSH, S. *et al.* Tribological role of synovial fluid compositions on artificial joints - a systematic review of the last 10 years. **Lubrication Science**, v. 26, n. 6, p. 387–410, out. 2014. DOI: <http://doi.org/10.1002/ls.1266>.

GODINO, L. *et al.* Modelling the wear evolution of a single alumina abrasive grain: Analyzing the influence of crystalline structure. **Journal of Materials Processing Technology**, Amsterdam, v. 277, p. 116464, mar. 2020. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116464>.

GOHAR, R.; RAHNEJAT, H. **Fundamentals of tribology**. 3. ed. Londres, UK: World, 2018. *E-book* (520 p.). (Scientific). ISBN 9781786345196 2018. Disponível em: [https://books.google.com.br/books?id=plloDwAAQBAJ&dq=Fundamentals+of+tribology&lr=&hl=pt-BR&source=gbp\\_navlinks\\_s](https://books.google.com.br/books?id=plloDwAAQBAJ&dq=Fundamentals+of+tribology&lr=&hl=pt-BR&source=gbp_navlinks_s). Acesso em: 17 sep. 2024.

GOHDA, S. Carbon nanoparticles prepared by the precipitation of soluble carbon materials. **Journal of Nanoparticle Research**, Heidelberg, v. 26, n. 7, p. 162, 17 jul. 2024. DOI: <http://doi.org/10.1007/s11051-024-06084-2>.

GONG, D.; XUE, Q.; WANG, H. ESCA study on tribochemical characteristics of filled PTFE. **Wear**, Amsterdam, v. 148, p. 161–169, 1991.

HAKAMI, F.; PRAMANIK, A.; BASAK, A. K. Tool wear and surface quality of metal matrix composites due to machining: a review. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, London, v. 231, n. 5, p. 739–752, 6 abr. 2017. DOI: <http://doi.org/10.1177/0954405416667402>.

HASE, A.; MISHINA, H.; WADA, M. Correlation between features of acoustic emission signals and mechanical wear mechanisms. **Wear**, Amsterdam, v. 292–293, p. 144–150, 15 jul. 2012. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.wear.2012.05.019>.

HIRANI, H. **Fundamentals of engineering tribology with applications**. Delhi, Índia: Cambridge University Press, 2016. *E-book* (442 p.). (Scientific). ISBN 9781107063877. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=1u27CwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR12&dq=Fundamentals+of+engineering+tribology+with+applications&ots=kZPD8qxXGw&sig=QLmvNUS6GQxUfGAM4fUadGRtfDI#v=onepage&q=Fundamentals%20of%20engineering%20tribology%20with%20applications&f=false>. Acesso em: 7 jul. 2025.

HOLWEGGER, W. *et al.* Non-destructive subsurface damage monitoring in bearings failure mode using fractal dimension analysis. **Industrial Lubrication and Tribology**, Bingley, v. 64, n. 3, p. 132–137, 20 abr. 2012. DOI: <http://doi.org/10.1108/00368791211218650>.

HORI, Y. **Foundations of hydrodynamic lubrication**. Tóquio, Japão: Springer Tokyo, 2006. *E-book* (231 p.). (Scientific). ISBN 978-4-431-27901-3. Disponível em: <https://link.springer.com/book/10.1007/4-431-27901-6>. Acesso em: 11 jul. 2025.

HSU, S. M.; YING, Z. C. **Nanotribology: critical assessment and research needs**. Boston, MA: Springer US, 2012. *E-book* (442 p.). (Scientific). ISBN 9781461510239. Disponível em: [https://books.google.com.br/books?id=Cj3VBwAAQBAJ&dq=Nanotribology:+Critical+assessment+and+research+needs&lr=&hl=pt-BR&source=gbs\\_navlinks\\_s](https://books.google.com.br/books?id=Cj3VBwAAQBAJ&dq=Nanotribology:+Critical+assessment+and+research+needs&lr=&hl=pt-BR&source=gbs_navlinks_s). Acesso em 11 jul. 2025.

HUTCHINGS, I.; SHIPWAY, P. **Tribology: friction and wear of engineering materials**. 2. ed. Cambridge, MA, US: Butterworth-Heinemann, 2017. *E-book* (412 p.). (Scientific). ISBN 9780081009512. Disponível em: [https://books.google.com.br/books?id=yRR2DQAAQBAJ&dq=Tribology:+Friction+and+Wear+of+Engineering+Materials&lr=&hl=pt-BR&source=gbs\\_navlinks\\_s](https://books.google.com.br/books?id=yRR2DQAAQBAJ&dq=Tribology:+Friction+and+Wear+of+Engineering+Materials&lr=&hl=pt-BR&source=gbs_navlinks_s). Acesso em: 11 jul. 2025.

HWANG, D. H. *et al.* Effects of material pair properties on the frictional behavior of metals. **Wear**, Amsterdam, v. 225–229, p. 600–614, 1999. DOI: [http://doi.org/10.1016/S0043-1648\(98\)00383-4](http://doi.org/10.1016/S0043-1648(98)00383-4).

KCHAOU, M. *et al.* Friction characteristics of a brake friction material under different braking conditions. **Materials and Design**, London, v. 52, p. 533–540, 2013. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.05.015>.

KLAASEN, H. *et al.* Adhesive wear performance of hardmetals and cermets. **Wear**, Amsterdam, v. 268, n. 9–10, p. 1122–1128, mar. 2010. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.wear.2010.01.006>.

KRUMPIEGL, T. *et al.* Amorphous carbon coatings and their tribological behaviour at high temperatures and in high vacuum. **Surface and Coatings Technology**, Lausanne, v. 120–121, p. 555–560, nov. 1999. DOI: [http://doi.org/10.1016/S0257-8972\(99\)00435-1](http://doi.org/10.1016/S0257-8972(99)00435-1).

KURRE, S. K.; YADAV, J. A review on bio-based feedstock, synthesis, and chemical modification to enhance tribological properties of biolubricants. **Industrial Crops and Products**, Amsterdam, v. 193, 1 mar. 2023. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.116122>.

LASCH, G. *et al.* Comparative tribological investigation of castor oil and its transesterified and aminolyzed derivatives. **Tribology International**, Oxford, v. 196, 1 ago. 2024. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.triboint.2024.109709>.

LEBEDEVA, I. L.; PRESNYAKOVA, G. N. Adhesion wear mechanisms under dry friction of titanium alloys in vacuum. **Wear**, Amsterdam, v. 148, n. 2, p. 203–210, ago. 1991. DOI: [http://doi.org/10.1016/0043-1648\(91\)90284-2](http://doi.org/10.1016/0043-1648(91)90284-2).

LEVI, O.; ELIAZ, N. Failure Analysis and Condition Monitoring of an Open-Loop Oil System Using Ferrography. **Tribology Letters**, New York, v. 36, n. 1, p. 17–29, 12 out. 2009. DOI: <http://doi.org/10.1007/s11249-009-9454-2>.

LIGIER, J.-L.; NOEL, B. Friction reduction and reliability for engines bearings. **Lubricants**, Basel, v. 3, n. 3, p. 569–596, 2015. DOI: <http://doi.org/10.3390/lubricants3030569>.

LUDEMA, K. History of tribology and its industrial significance. *In: Fundamentals of Tribology and Bridging the Gap Between the Macro-and Micro/Nanoscales*. 1. ed. Michigan, US: Springer Netherlands, 2001.

LUNA, F. M. T. *et al.* Assessment of biodegradability and oxidation stability of mineral, vegetable and synthetic oil samples. **Industrial Crops and Products**, Amsterdam, v. 33, n. 3, p. 579–583, maio 2011. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.indcrop.2010.12.012>.

LUO, Q. Origin of Friction in Running-in Sliding Wear of Nitride Coatings. **Tribology Letters**, New York, v. 37, n. 3, p. 529–539, 25 mar. 2010. DOI: <http://doi.org/10.1007/s11249-009-9548-x>.

MAIR, L. H. *et al.* Wear: mechanisms, manifestations and measurement. Report of a workshop\*. **Journal of Denty**, London, v. 24, n. 95, p. 141–189, 1996. DOI: [http://doi.org/10.1016/0300-5712\(95\)00043-7](http://doi.org/10.1016/0300-5712(95)00043-7).

MASSON, J. F. *et al.* Melting and glass transitions in paraffinic and naphthenic oils. **Thermochimica Acta**, Amsterdam, v. 440, n. 2, p. 132–140, jan. 2006. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.tca.2005.11.001>.

MIYOSHI, K. Considerations in vacuum tribology (adhesion, friction, wear, and solid lubrication in vacuum). **Tribology International**, Oxford, v. 32, n. 11, p. 605–616, nov. 1999. DOI: [http://doi.org/10.1016/S0301-679X\(99\)00093-6](http://doi.org/10.1016/S0301-679X(99)00093-6).

MOBARAK, H. M. *et al.* The prospects of biolubricants as alternatives in automotive applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Oxford, v. 33, p. 34–43, maio 2014. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.062>.

MURAKAMI, Y. Material defects as the basis of fatigue design. **International Journal of Fatigue**, London, v. 41, p. 2–10, ago. 2012. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2011.12.001>.

NEHME, G.; MOURHATCH, R.; ASWATH, P. B. Effect of contact load and lubricant volume on the properties of tribofilms formed under boundary lubrication in a fully formulated oil under extreme load conditions. **Wear**, Amsterdam, v. 268, n. 9–10, p. 1129–1147, mar. 2010. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.wear.2010.01.001>.

NATIONAL LUBRICATING GREASE INSTITUTE. **NLGI – ASTM D217**: Degree of consistency. Missouri, US: NLGI, 2003. Disponível em: <<https://www.nlgi.org/>>. Acesso em: 29 jun. 2025.

OGUNNIYI, D. Castor oil: A vital industrial raw material. **Bioresource Technology**, Amsterdam, v. 97, n. 9, p. 1086–1091, jun. 2006. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.03.028>.

ORNDORFF JR, R. L. Water-lubricated rubber bearings, history and new developments. **Naval Engineers Journal**, Langhorne, v. 97, n. 7, p. 39–52, 1985. DOI: <http://doi.org/10.1111/j.1559-3584.1985.tb01877.x>.

OUYANG, J. H. *et al.* High-Temperature Solid Lubricants and Self-Lubricating Composites: A Critical Review. **Lubricants**, Basel, v. 10, n. 8, p. 177, 7 ago. 2022. DOI: <http://doi.org/10.3390/lubricants10080177>.

PATEL, V. R. *et al.* Castor Oil: Properties, Uses, and Optimization of Processing Parameters in Commercial Production. **Lipid Insights**, London, v. 9, 7 jan. 2016. DOI: <http://doi.org/10.4137/LPI.S40233>.

PAULSON, N. R.; SADEGHI, F.; HABCHI, W. A coupled finite element EHL and continuum damage mechanics model for rolling contact fatigue. **Tribology International**, Oxford, v. 107, p. 173–183, mar. 2017. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.triboint.2016.11.024>.

PELEG, M. Temperature–viscosity models reassessed. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, New York, v. 58, n. 15, p. 2663–2672, 13 out. 2018. DOI: <http://doi.org/10.1080/10408398.2017.1325836>.

PETROBRAS. **Óleos básicos lubrificantes**. Rio de Janeiro: PETROBRAS, 2025. Disponível em: <<https://petrobras.com.br/>>. Acesso em: 7 jul. 2025.

QUINCHIA, L. A. *et al.* Tribological studies of potential vegetable oil-based lubricants containing environmentally friendly viscosity modifiers. **Tribology International**, Oxford, v. 69, p. 110–117, 2014. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.triboint.2013.08.016>.

REEVES, C. J.; SIDDAIAH, A.; MENEZES, P. L. A Review on the Science and Technology of Natural and Synthetic Biolubricants. **Journal of Bio- and Tribo-Corrosion**, Heidelberg, v. 3, n. 1, 1 mar. 2017. DOI: <http://doi.org/10.1007/s40735-016-0069-5>.

RODRIGUES TEIXEIRA, C. **Influência dos erros geométricos de afiação nas brocas helicoidais de aço rápido na qualidade dos furos produzidos**. 1995. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1995. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/76274/100210.pdf?sequence=1>. Acesso em: 10 jul. 2025.

RUIJIE, Z. *et al.* Research progress on rolling contact fatigue damage of bainitic rail steel. **Engineering Failure Analysis**, Oxford, v. 143, p. 106875, jan. 2023. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106875>.

SALIH, N.; SALIMON, J.; YOUSIF, E. The physicochemical and tribological properties of oleic acid based triester biolubricants. **Industrial Crops and Products**, Amsterdam, v. 34, n. 1, p. 1089–1096, jul. 2011. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.indcrop.2011.03.025>.

SALIMON, J.; SALIH, N.; YOUSIF, E. Biolubricants: Raw materials, chemical modifications and environmental benefits. **European Journal of Lipid Science and Technology**, Weinheim, v. 112, n. 5, p. 519–530, maio 2010. DOI: <http://doi.org/10.1002/ejlt.200900205>.

SALIMON, J.; SALIH, N.; YOUSIF, E. Improvement of pour point and oxidative stability of synthetic ester basestocks for biolubricant applications. **Arabian Journal of Chemistry**, Pittsford, v. 5, n. 2, p. 193–200, abr. 2012. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.arabjc.2010.09.001>.

SHARMA, B. K. *et al.* Soybean Oil Based Greases: Influence of Composition on Thermo-oxidative and Tribochemical Behavior. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Washington, v. 53, n. 8, p. 2961–2968, 1 abr. 2005. DOI: <http://doi.org/10.1021/jf0486702>.

SINGH, Y. *et al.* Sustainability of a non-edible vegetable oil based bio-lubricant for automotive applications: A review. **Process Safety and Environmental Protection**, London, v. 111, p. 701–713, 2017a. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.psep.2017.08.041>.

SLAVEC, G. **Validação tribológica de biograxas sintetizadas comparadas com graxas minerais comerciais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, São Paulo, 2020. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/7206a041-c63f-4238-addd-dec9eab5f04a/content>. Acesso em: 22 jul. 2025.

SODA, N.; KIMURA, Y.; TANAKA, A. Wear of some F.C.C. metals during unlubricated sliding part IV: Effects of atmospheric pressure on wear. **Wear**, Amsterdam, v. 43, n. 2, p. 165–174, jun. 1977. DOI: [http://doi.org/10.1016/0043-1648\(77\)90111-9](http://doi.org/10.1016/0043-1648(77)90111-9).

SOLTANI, M. E. *et al.* A Comparative Investigation on the Tribological Performance and Physicochemical Properties of Biolubricants of Various Sources, a Petroleum-Based Lubricant, and Blends of the Petroleum-Based Lubricant and Crambe Oil. **Tribology Transactions**, v. 63, n. 6, p. 1121–1134, 1 nov. 2020. DOI: <http://doi.org/10.1080/10402004.2020.1795331>.

SONG, H. *et al.* Low friction and wear properties of carbon nanomaterials in high vacuum environment. **Tribology International**, Oxford, v. 143, p. 106058, mar. 2020. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.106058>.

STACHOWIAK, G.; BATCHELOR, A. W. **Engineering tribology**. 5. ed. Cambridge, MA, US: Butterworth-Heinemann, 2025. *E-book* (900 p.). (Scientific). ISBN 9780443341502. Disponível em: [https://books.google.com.br/books?id=LNMMmEQAAQBAJ&dq=Engineering+tribology&lr=&hl=pt-BR&source=gbs\\_navlinks\\_s](https://books.google.com.br/books?id=LNMMmEQAAQBAJ&dq=Engineering+tribology&lr=&hl=pt-BR&source=gbs_navlinks_s). Acesso em: 8 jul. 2025.

STRATIEV, D. *et al.* Challenges in characterization of residual oils: a review. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, Amsterdam, v. 178, p. 227–250, jul. 2019. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.03.026>.

TANG, Z.; LI, S. A review of recent developments of friction modifiers for liquid lubricants (2007–present). **Current Opinion in Solid State and Materials Science**, Oxford, v. 18, n. 3, p. 119–139, jun. 2014. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.cossms.2014.02.002>.

TIWARI, A.; DUBEY, S. P. Analysis of wear rate of internal combustion engine using ferrography technique. **International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)**, Mudaliarpet, v. 4, n. 06, 2017.

TRAUSMUTH, A. *et al.* Impact of corrosion on sliding wear properties of low-alloyed carbon steel. **Wear**, Amsterdam, v. 328–329, p. 338–347, abr. 2015. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.wear.2015.02.061>.

UPADHYAY, R. K. Microscopic technique to determine various wear modes of used engine oil. **Journal of Microscopy and Ultrastructure**, Mumbai, v. 1, n. 3, p. 111, 2013. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jmau.2013.09.002>.

VALDES, M. J. *et al.* TRIBOMETRY: How is friction research quantified? A review. **International Journal of Engineering Research and Technology**, New Delhi, v. 13, n. 10, p. 2596, 31 out. 2020. DOI: <http://doi.org/10.37624/IJERT/13.10.2020.2596-2610>.

VIJAY, A.; SADEGHI, F. Rolling contact fatigue of coupled EHL and anisotropic polycrystalline materials. **Tribology International**, Oxford, v. 169, p. 107479, maio 2022. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.triboint.2022.107479>.

WEN, S.; HUANG, P. **Principles of tribology**. 2. ed. Beijing, China: John Wiley & Sons, 2017. *E-book* (608 p.). (Scientific). ISBN 9781119214922. Disponível em: [https://books.google.com.br/books?id=ANooDwAAQBAJ&dq=Principles+of+tribology&lr=&hl=pt-BR&source=gbs\\_navlinks\\_s](https://books.google.com.br/books?id=ANooDwAAQBAJ&dq=Principles+of+tribology&lr=&hl=pt-BR&source=gbs_navlinks_s). Acesso em: 9 jul. 2025.

XIA, Z. *et al.* Rolling contact fatigue failure mechanism of bearing steel on different surface roughness levels under heavy load. **International Journal of Fatigue**, London, v. 179, p. 108042, fev. 2024. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2023.108042>.

YETIM, A. F. Investigation of wear behavior of titanium oxide films, produced by anodic oxidation, on commercially pure titanium in vacuum conditions. **Surface and Coatings Technology**, Lausanne, v. 205, n. 6, p. 1757–1763, dez. 2010. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2010.08.079>.

ZHANG, C. *et al.* Friction reducing and anti-wear property of metallic friction pairs under lubrication of aqueous solutions with polyether added. **Wear**, Amsterdam, v. 292–293, p. 11–16, 15 jul. 2012. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.wear.2012.06.005>.

ZHANG, R. *et al.* Study on fatigue wear competition mechanism and microstructure evolution on the surface of a bainitic steel rail. **Wear**, Amsterdam, v. 482–483, 15 out. 2021. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203978>.

ZOUARI, M. *et al.* A comparative investigation of the tribological behavior and scratch response of polyester powder coatings filled with different solid lubricants. **Progress in Organic Coatings**, Amsterdam, v. 77, n. 9, p. 1408–1417, set. 2014. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2014.04.023>.