

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA - CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

GÜIDO ALVES SLAVEC

**VALIDAÇÃO TRIBOLÓGICA DE BIOGRAXAS SINTETIZADAS
COMPARADAS COM GRAXAS MINERAIS COMERCIAIS**

**Ilha Solteira
2020**

GÜIDO ALVES SLAVEC

**VALIDAÇÃO TRIBOLÓGICA DE BIOGRAXAS SINTETIZADAS
COMPARADAS COM GRAXAS MINERAIS COMERCIAIS**

Dissertação de Mestrado apresentada à
Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira -
UNESP, como parte dos requisitos
necessários para obtenção do título de
Mestre em Engenharia Mecânica.
Área de conhecimento: Mecânica dos
Sólidos.

Prof. Dr. Aparecido Carlos Gonçalves
Orientador.

**Prof. Dr. Nelson Roberto Antoniosi
Filho**
Coorientador.

**Ilha Solteira
2020**

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

S631v Slavec, Gúido Alves.
Validação tribológica de biograxas sintetizadas comparadas com graxas minerais comerciais / Gúido Alves Slavec. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2020
164 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Mecânica dos Sólidos, 2020

Orientador: Aparecido Carlos Gonçalves
Coorientador: Nelson Roberto Antoniosi Filho
Inclui bibliografia

1. Análise de vibrações. 2. Algoritmo de seleção negativa. 3. Biograxa. 4. Graxa mineral. 5. Monitoramento de integridade estrutural. 6. Tribologia.


Raiane da Silva Santos



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Ilha Solteira

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Validação Tribológica de Biograxas Sintetizadas Comparadas Com Graxas Minerais Comerciais

AUTOR: GUIDO ALVES SLAVEC

ORIENTADOR: APARECIDO CARLOS GONCALVES

COORIENTADOR: NELSON ROBERTO ANTONIOSI FILHO

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em ENGENHARIA MECÂNICA, área: Mecânica dos Sólidos pela Comissão Examinadora:

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

Prof. Dr. FABIO ROBERTO CHAVARETTE
Departamento de Matemática / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Dr. SAMUEL JOSÉ CASARIN
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP

Ilha Solteira, 21 de agosto de 2020

Dedico este trabalho aos meus pais Valdir Slavec (*in memoriam*) e Mariana Alves Slavec, que se esforçaram e batalharam com muito amor e dedicação durante toda a vida para dar um futuro melhor a mim e ao meu irmão. E dedico também a todos, que todos os dias, se dedicam de corpo, alma e coração a engenharia, em especial, a Engenharia Mecânica.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por todas as bênçãos concedidas e por me proporcionar saúde, sabedoria e forças para concretizar mais esta árdua etapa de minha vida.

À toda minha família, pelo tempo que deixei de estar junto para me dedicar aos estudos, além de serem fonte de apoio, motivação e incentivo.

À Universidade Estadual Paulista – UNESP, campus de Ilha Solteira, pelo conhecimento intelectual e pessoal adquirido por meio do corpo docente, além de disponibilizar toda a estrutura para a realização deste projeto.

Ao Prof. Dr. Aparecido Carlos Gonçalves, por todos os seus atos como orientador, postura profissional, compreensão, amizade e ensinamentos transmitidos ao longo do mestrado.

Ao Prof. Dr. Nelson Roberto Antoniosi Filho, pela sua coorientação e sugestões, pelo fornecimento das biograxas sintetizadas utilizadas neste trabalho e por ter me ajudado na realização de alguns resultados, sendo o intermediário entre mim e o laboratório de microscopia óptica da Universidade Federal do Goiás – UFG.

Ao Prof. Dr. Fábio Roberto Chavarette, pela paciência e toda ajuda na realização desta dissertação.

Aos meus amigos Carlos Felipe, Emerson e Lucas Zanovello, pela amizade, ajuda e incentivo. Um agradecimento especial também ao Guilherme (Soldado), pela ajuda laboratorial.

Aos meus amigos de condomínio e posteriormente de república (Tomilicana), Matheus Zuffo, Matheus (Toba), Guilherme (Boizin), Valter (Fiote), João Henrique (Mijão), José Ricardo (Susto), Fábio (Jacu) e Vinícius (Mago), pelos momentos de descontração e boas lembranças.

E a todos os integrantes do bloco M3 do departamento de engenharia mecânica que de forma direta ou indireta foram envolvidos na realização deste trabalho, em especial ao Carlos José Santana, pelo apoio técnico dado na realização dos ensaios e demais formas de colaboração.

Muito obrigado a todos.

Güido Alves Slavec

“Nunca desista de seus objetivos mesmo que esses pareçam impossíveis. A próxima tentativa pode ser a vitoriosa”.

(Albert Einstein)

RESUMO

A dependência atual e a possível escassez dos recursos de petróleo e gás natural no futuro são grandes preocupações mundiais. Óleos de base mineral são muito utilizados como lubrificantes em aplicações industriais. Devido à alta demanda e dependência da indústria destes lubrificantes, o desenvolvimento, a produção e o uso de bases alternativas tornaram-se uma estratégia de mercado. Os lubrificantes de base vegetal são provenientes de fontes renováveis, mais biodegradáveis, menos tóxicos e, em alguns casos, podem apresentar melhores performances (ter um alto potencial lubrificante) quando comparados aos lubrificantes minerais. O presente trabalho tem como objetivo analisar se através da integração de técnicas preditivas, tais como a análise de partículas de desgaste e o monitoramento dos sinais de vibração, é possível validar graxas de base vegetal (óleo de soja sintetizado) comparando-as com graxas de base mineral comercial. A metodologia consiste na utilização de um tribômetro instrumentado do tipo pin/ball-on-disk determinando-se, mediante o uso de ensaios experimentais e análise de propriedades dos materiais, os coeficientes de atrito, as temperaturas da superfície de contato, as quantificações de desgaste, bem como a concentração e a natureza das partículas ferromagnéticas presentes nas amostras, através de diferentes testes tribológicos. Além disso, com a aquisição dos sinais de vibrações, emprega-se um algoritmo de sistema imunológico artificial de seleção negativa, baseado em conceitos de Monitoramento de Integridade Estrutural (SHM), capaz de identificar e classificar estes sinais em falhas ou não-falhas. Entre as nove amostras de biograxas analisadas, a LGQ04, LGQ05 e LGQ07 (ambas com espessante de lítio) exibiram desempenhos tribológicos semelhantes às graxas minerais comerciais, enquanto que as biograxas LGQ01, LGQ02 e LGQ03 (ambas com espessante de sódio) apresentaram performances inferiores com relação às demais. No entanto, os resultados revelaram-se satisfatórios e provam que a metodologia experimental utilizada na validação das biograxas demonstrou-se eficaz e precisa.

Palavras-chave: Análise de vibrações. Algoritmo de seleção negativa. Biograxa. Graxa mineral. Monitoramento de integridade estrutural. Tribologia.

ABSTRACT

The current dependence and possible scarcity of oil and natural gas resources in the future are major concerns throughout the world. Mineral-based oils are widely used as lubricants in industrial applications. Due to the high demand and industry dependence on these lubricants, the development, production, and use of alternative bases have become a market strategy. Vegetable-based lubricants come from renewable sources, more biodegradable, less toxic, and, in some cases, can perform better (have a high lubricating potential) when compared to mineral lubricants. The present work aims to analyze whether, through the integration of predictive techniques, such as the analysis of wear particles and the monitoring of vibration signals, it is possible to validate vegetable-based greases (synthesized soy oil) by comparing them with commercial mineral-based greases. The methodology consists of the use of an instrumented tribometer of the pin/ball-on-disk type, determining, with experimental tests and analysis of material properties, the friction coefficients, the contact surface temperatures, the wear quantifications, as well as the concentration and nature of the ferromagnetic particles present in the samples, through different tribological tests. Also, with the acquisition of vibration signals, an artificial immune system negative selection algorithm was used, based on Structural Health Monitoring (SHM) concepts, capable of identifying and classifying these signals into failures or non-failures. Among the nine samples of vegetable-based greases analyzed, the LGQ04, LGQ05, and LGQ07 (both with lithium thickeners) exhibited tribological performances similar to mineral-based greases, while the vegetable-based greases LGQ01, LGQ02, and LGQ03 (both with sodium thickeners) showed lower performance compared to the others samples. The results proved to be satisfactory and prove that the experimental methodology used in the validation of vegetable-based greases proved to be effective and accurate.

Keywords: Vibration analysis. Negative selection algorithm. Vegetable-based grease. Mineral-based grease. Structural Health Monitoring. Tribology.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	- Fases da manutenção preditiva ou condicional.....	27
Figura 2	- Três parâmetros básicos que afetam os comportamentos de atrito desgaste em um tribossistema lubrificado.....	30
Figura 3	- Componentes de uma máquina do tipo pino sobre disco.....	33
Figura 4	- Coeficiente de atrito em função da distância de deslizamento com uma curva típica em forma de S mostrando o período de amaciamento.....	34
Figura 5	- Quatro casos hipotéticos de coeficientes de atrito.....	35
Figura 6	- a) Atrito por deslizamento e b) Atrito por rolamento.....	36
Figura 7	- Representação da força de atrito.....	36
Figura 8	- Os quatro principais mecanismos de desgaste.....	37
Figura 9	- Modo de desgaste adesivo.....	38
Figura 10	- Classificação do desgaste abrasivo.....	41
Figura 11	- Modos de deformação do desgaste abrasivo.....	41
Figura 12	- Modos de deformação do desgaste abrasivo.....	42
Figura 13	- Mecanismo de desgaste por fadiga.....	43
Figura 14	- Falhas superficiais por crateração (pitting) e lascamento (spalling) devido ao desgaste por fadiga.....	43
Figura 15	- Rolamento após desgaste químico.....	45
Figura 16	- Estrutura fibrosa de um espessante.....	50
Figura 17	- a) Penetrômetro e b) Copo para a graxa e cone padrão.....	52
Figura 18	- Monitor automático de partículas (PQA).....	57
Figura 19	- a) RPD e b) Ferrograma.....	58
Figura 20	- Filtragem por membrana.....	59
Figura 21	- Ferrosópio.....	60
Figura 22	- Partículas de desgaste normal por atrito observadas na análise ferrográfica de amostras de óleo.....	63
Figura 23	- Partículas de desgaste severo. Fotos tiradas na mesma posição com ampliações diferentes.....	64
Figura 24	- Partícula de desgaste severo. Destaque para mudança de coloração..	64
Figura 25	- Partículas de desgaste por corte observadas na análise ferrográfica	

	de amostras de óleo.....	65
Figura 26	- Partículas esféricas.....	66
Figura 27	- Partículas de fadiga em formas de lascas.....	67
Figura 28	- Partículas laminares.....	68
Figura 29	- Partículas de fadiga por engrenamento.....	68
Figura 30	- Partículas de desgaste típicas de Scuffing.....	69
Figura 31	- Partículas de alumínio.....	70
Figura 32	- Partículas de cobre.....	70
Figura 33	- Partículas de liga Pb/Sn.....	71
Figura 34	- Partículas de liga Pb/Sn antes e depois de sofrer tratamento térmico	71
Figura 35	- Partículas de óxidos ferrosos.....	72
Figura 36	- Partículas policristalinas vistas através da luz branca refletida.....	73
Figura 37	- Partículas policristalinas vistas através da luz polarizada refletida....	73
Figura 38	- Partículas de óxido de ferro vermelho.....	73
Figura 39	- Partículas de óxido de ferro preto.....	74
Figura 40	- Partículas de óxido-metálico escuro.....	75
Figura 41	- O processo de SHM baseado no paradigma de reconhecimento de padrão estatístico.....	77
Figura 42	- Fluxograma da fase de sensoriamento do ASN.....	81
Figura 43	- Fluxograma da fase de monitoramento do ASN.....	81
Figura 44	- Pin-on-disk: a) vista frontal e b) vista lateral do tribômetro.....	85
Figura 45	- Componentes elétricos e eletrônicos utilizados no tribômetro.....	86
Figura 46	- Ilustração do pino e disco de aço SAE 1040 utilizados nos ensaios..	87
Figura 47	- Procedimentos para a preparação das amostras.....	87
Figura 48	- Durômetro utilizado no ensaio de dureza superficial.....	88
Figura 49	- Balança analítica de precisão.....	88
Figura 50	- Ilustração detalhada do par tribológico.....	90
Figura 51	- Ilustração detalhada das amostras de biograxas.....	91
Figura 52	- Ilustração detalhada das amostras de graxas minerais.....	91
Figura 53	- Espectrômetro de raios X.....	94
Figura 54	- PQA do laboratório LAPO.....	95
Figura 55	- Sistema de filtragem por membrana de celulose.....	96
Figura 56	- Ferrosκόpio do laboratório de Tribologia.....	97

Figura 57	- Rugosidade média aritmética (Ra) das amostras.....	98
Figura 58	- Coeficientes de atrito da biograxa LGQ01.....	99
Figura 59	- Temperaturas na superfície de contato utilizando a biograxa LGQ01.....	100
Figura 60	- Espectros produzidos na biograxa LGQ01.....	103
Figura 61	- Partículas obtidas da biograxa LGQ01.....	103
Figura 62	- Coeficientes de atrito da biograxa LGQ02.....	104
Figura 63	- Temperaturas na superfície de contato utilizando a biograxa LGQ02.....	104
Figura 64	- Espectros produzidos na biograxa LGQ02.....	107
Figura 65	- Partículas obtidas da biograxa LGQ02.....	107
Figura 66	- Partícula da biograxa LGQ02 ampliada em 500 vezes.....	108
Figura 67	- Coeficientes de atrito da biograxa LGQ03.....	108
Figura 68	- Temperaturas na superfície de contato utilizando a biograxa LGQ03.....	109
Figura 69	- Espectros produzidos na biograxa LGQ03.....	111
Figura 70	- Partículas obtidas da biograxa LGQ03.....	112
Figura 71	- Partículas da biograxa LGQ03 ampliadas em 500 vezes.....	112
Figura 72	- Coeficientes de atrito da biograxa LGQ04.....	113
Figura 73	- Temperaturas na superfície de contato utilizando a biograxa LGQ04.....	113
Figura 74	- Espectros produzidos na biograxa LGQ04.....	116
Figura 75	- Partículas obtidas da biograxa LGQ04.....	116
Figura 76	- Coeficientes de atrito da biograxa LGQ05.....	117
Figura 77	- Temperaturas na superfície de contato utilizando a biograxa LGQ05.....	117
Figura 78	- Espectros produzidos na biograxa LGQ05.....	120
Figura 79	- Partículas obtidas da biograxa LGQ05.....	120
Figura 80	- Coeficientes de atrito da biograxa LGQ06.....	121
Figura 81	- Temperaturas na superfície de contato utilizando a biograxa LGQ06.....	121
Figura 82	- Espectros produzidos na biograxa LGQ06.....	124
Figura 83	- Partículas obtidas da biograxa LGQ06.....	124

Figura 84	- Coeficientes de atrito da biograxa LGQ07.....	125
Figura 85	- Temperaturas na superfície de contato utilizando a biograxa LGQ07.....	125
Figura 86	- Espectros produzidos na biograxa LGQ07.....	128
Figura 87	- Partículas obtidas da biograxa LGQ07.....	128
Figura 88	- Coeficientes de atrito da biograxa LGQ08.....	129
Figura 89	- Temperaturas na superfície de contato utilizando a biograxa LGQ08.....	129
Figura 90	- Espectros produzidos na biograxa LGQ08.....	132
Figura 91	- Partículas obtidas da biograxa LGQ08.....	132
Figura 92	- Coeficientes de atrito da biograxa LGQ09.....	133
Figura 93	- Temperaturas na superfície de contato utilizando a biograxa LGQ09.....	133
Figura 94	- Espectros produzidos na biograxa LGQ09.....	136
Figura 95	- Partículas obtidas da biograxa LGQ09.....	136
Figura 96	- Coeficientes de atrito utilizando graxa branca.....	137
Figura 97	- Temperaturas na superfície de contato utilizando graxa branca.....	137
Figura 98	- Espectros produzidos na graxa comercial branca.....	140
Figura 99	- Partículas obtidas da graxa comercial branca.....	140
Figura 100	- Coeficientes de atrito utilizando graxa azul.....	141
Figura 101	- Temperaturas na superfície de contato utilizando graxa azul.....	141
Figura 102	- Espectros produzidos na graxa comercial azul.....	144
Figura 103	- Partículas obtidas da graxa comercial azul.....	144
Figura 104	- Classificação dos sinais de vibração.....	147
Figura 105	- Classificação da graxa azul.....	147
Figura 106	- Classificação da biograxa LGQ01.....	148
Figura 107	- Classificação da biograxa LGQ02.....	148
Figura 108	- Classificação da biograxa LGQ03.....	148
Figura 109	- Classificação da biograxa LGQ04.....	149
Figura 110	- Classificação da biograxa LGQ05.....	149
Figura 111	- Classificação da biograxa LGQ06.....	149
Figura 112	- Classificação da biograxa LGQ07.....	150
Figura 113	- Classificação da biograxa LGQ08.....	150

Figura 114	- Classificação da biograxa LGQ09.....	151
Figura 115	- Classificação da graxa branca.....	151
Figura 116	- Classificação da biograxa LGQ01.....	152
Figura 117	- Classificação da biograxa LGQ02.....	152
Figura 118	- Classificação da biograxa LGQ03.....	152
Figura 119	- Classificação da biograxa LGQ04.....	153
Figura 120	- Classificação da biograxa LGQ05.....	153
Figura 121	- Classificação da biograxa LGQ06.....	153
Figura 122	- Classificação da biograxa LGQ07.....	154
Figura 123	- Classificação da biograxa LGQ08.....	154
Figura 124	- Classificação da biograxa LGQ09.....	154

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Números de consistências NLGI.....	52
Tabela 2	- Morfologia das partículas e modo de desgaste.....	54
Tabela 3	- Valores Críticos para o Cociente de Rejeição, Q.....	84
Tabela 4	- Parâmetros definidos para os experimentos.....	89
Tabela 5	- Descrição dos lubrificantes.....	92
Tabela 6	- Principais resultados de coeficiente de atrito e temperatura LGQ01.....	100
Tabela 7	- Valores de perdas de massa e volume das amostras – LGQ01.....	101
Tabela 8	- Coeficientes e taxas de desgaste – LGQ01.....	101
Tabela 9	- Índices PQ determinados através do PQA – LGQ01.....	102
Tabela 10	- Concentrações dos elementos químicos – LGQ01.....	102
Tabela 11	- Principais resultados de coeficiente de atrito e temperatura LGQ02.....	105
Tabela 12	- Valores de perdas de massa e volume das amostras – LGQ02.....	105
Tabela 13	- Coeficientes e taxas de desgaste – LGQ02.....	105
Tabela 14	- Índices PQ determinados através do PQA – LGQ02.....	106
Tabela 15	- Concentrações dos elementos químicos – LGQ02.....	106
Tabela 16	- Principais resultados de coeficiente de atrito e temperatura LGQ03.....	109
Tabela 17	- Valores de perdas de massa e volume das amostras – LGQ03.....	109
Tabela 18	- Coeficientes e taxas de desgaste – LGQ03.....	110
Tabela 19	- Índices PQ determinados através do PQA – LGQ03.....	110
Tabela 20	- Concentrações dos elementos químicos – LGQ03.....	111
Tabela 21	- Principais resultados de coeficiente de atrito e temperatura LGQ04.....	113
Tabela 22	- Valores de perdas de massa e volume das amostras – LGQ04.....	114
Tabela 23	- Coeficientes e taxas de desgaste – LGQ04.....	114
Tabela 24	- Índices PQ determinados através do PQA – LGQ04.....	115
Tabela 25	- Concentrações dos elementos químicos – LGQ04.....	115
Tabela 26	- Principais resultados de coeficiente de atrito e temperatura LGQ05.....	117
Tabela 27	- Valores de perdas de massa e volume das amostras – LGQ05.....	118

Tabela 28	- Coeficientes e taxas de desgaste – LGQ05.....	118
Tabela 29	- Índices PQ determinados através do PQA – LGQ05.....	119
Tabela 30	- Concentrações dos elementos químicos – LGQ05.....	119
Tabela 31	- Principais resultados de coeficiente de atrito e temperatura LGQ06.....	122
Tabela 32	- Valores de perdas de massa e volume das amostras – LGQ06.....	122
Tabela 33	- Coeficientes e taxas de desgaste – LGQ06.....	122
Tabela 34	- Índices PQ determinados através do PQA – LGQ06.....	123
Tabela 35	- Concentrações dos elementos químicos – LGQ06.....	123
Tabela 36	- Principais resultados de coeficiente de atrito e temperatura LGQ07.....	125
Tabela 37	- Valores de perdas de massa e volume das amostras – LGQ07.....	126
Tabela 38	- Coeficientes e taxas de desgaste – LGQ07.....	126
Tabela 39	- Índices PQ determinados através do PQA – LGQ07.....	127
Tabela 40	- Concentrações dos elementos químicos – LGQ07.....	127
Tabela 41	- Principais resultados de coeficiente de atrito e temperatura LGQ08.....	130
Tabela 42	- Valores de perdas de massa e volume das amostras – LGQ08.....	130
Tabela 43	- Coeficientes e taxas de desgaste – LGQ08.....	130
Tabela 44	- Índices PQ determinados através do PQA – LGQ08.....	131
Tabela 45	- Concentrações dos elementos químicos – LGQ08.....	131
Tabela 46	- Principais resultados de coeficiente de atrito e temperatura LGQ09.....	133
Tabela 47	- Valores de perdas de massa e volume das amostras – LGQ09.....	134
Tabela 48	- Coeficientes e taxas de desgaste – LGQ09.....	134
Tabela 49	- Índices PQ determinados através do PQA – LGQ09.....	135
Tabela 50	- Concentrações dos elementos químicos – LGQ09.....	135
Tabela 51	- Principais resultados de coeficiente de atrito e temperatura – Graxa Branca.....	138
Tabela 52	- Valores de perdas de massa e volume das amostras – Grax Branca.....	138
Tabela 53	- Coeficientes e taxas de desgaste – Graxa Branca.....	138
Tabela 54	- Índices PQ determinados através do PQA – Graxa Branca.....	139

Tabela 55	-	Concentrações dos elementos químicos – Graxa Branca.....	139
Tabela 56	-	Principais resultados de coeficiente de atrito e temperatura – Graxa Azul.....	141
Tabela 57	-	Valores de perdas de massa e volume das amostras – Graxa Azul.....	142
Tabela 58	-	Coeficientes e taxas de desgaste – Graxa Azul.....	142
Tabela 59	-	Índices PQ determinados através do PQA – Graxa Azul.....	143
Tabela 60	-	Concentrações de partículas – Graxa Azul.....	143
Tabela 61	-	Principais resultados obtidos das biograxas e graxas.....	145

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
A_r	Área real de contato
ASN	Algoritmo de Seleção Negativa
d	Densidade do material
DR	<i>Direct Reading</i>
EHL	Elasto-hidrodinâmico
F_{at}	Força de atrito
H	Dureza do material
HBS	<i>Brinell Hardness Number</i>
HRA	<i>Rockwell Hardness Number</i>
K	Coefficiente de desgaste
L_p	<i>Large particles</i>
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
ML	Perda de Massa
MO	Microscopia Óptica
N	Força Normal
NLGI	<i>National Lubricating Grease Institute</i>
PLP	Porcentagem de partículas grandes
PQA	<i>Particle Quantifier Analysis</i> – Monitor automático de partículas
ferrosas	
R	Conjunto de detectores
R_0	Cadeias geradas aleatoriamente
R_a	Rugosidade na média aritmética
RMS	Valor eficaz
RPD	<i>Rotary Particle Depositor</i>
S	Conjunto de cadeias próprias
sd	Distancia de deslizamento
SHM	<i>Structural Health Monitoring</i> - Monitoramento de Integridade
Estrutural	
SIA	Sistema Imunológico Artificial
SIB	Sistema Imunológico Biológico
S_p	<i>Small particles</i>

V	Velocidade de deslizamento
VI	Índice de viscosidade
VL	Perda de volume
w	Volume de material desgastado por unidade de deslizamento
WPC	Valor da concentração total de partículas de desgaste
m	Coefficiente de atrito
q	Taxa de desgaste de volume de material removido pela distância de deslizamento
y	Taxa de desgaste

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	MOTIVAÇÃO.....	22
1.2	OBJETIVO.....	24
2	REVISÃO DA LITERATURA	26
2.1	MANUTENÇÃO.....	26
2.2	TRIBOLOGIA.....	29
2.2.1	Tribômetro	32
2.2.2	Atrito e desgaste	35
2.2.2.1	<i>Desgaste adesivo</i>	38
2.2.2.2	<i>Desgaste abrasivo</i>	40
2.2.2.3	<i>Desgaste por fadiga superficial</i>	42
2.2.2.4	<i>Desgaste por reações triboquímicas</i>	44
2.2.3	Lubrificação	45
2.2.3.1	<i>Lubrificantes líquidos</i>	46
2.2.3.1.1	<i>Principais propriedades dos óleos lubrificantes</i>	47
2.2.3.1.1.1	<u>Viscosidade</u>	47
2.2.3.1.1.2	<u>Índice de viscosidade</u>	47
2.2.3.2	<i>Lubrificantes pastosos</i>	48
2.2.3.2.1	<i>Composição</i>	48
2.2.3.2.2	<i>Fabricação</i>	49
2.2.3.2.3	<i>Estrutura</i>	50
2.2.3.2.4	<i>Principais propriedades das graxas lubrificantes</i>	51
2.2.3.2.4.1	<u>Número de consistência NLGI (NLGI consistency number)</u>	51
2.2.3.2.4.2	<u>Ponto de gota</u>	53
2.2.4	Análise de lubrificantes	53
2.2.5	Preparação da amostra	54
2.2.6	Técnicas de análise de lubrificantes	55
2.2.6.1	<i>Ferrografia</i>	55
2.2.6.2	<i>Ferrografia quantitativa</i>	56
2.2.6.3	<i>Ferrografia analítica</i>	57
2.2.6.4	<i>Filtragem por membrana</i>	58

2.2.6.5	<i>Microscopia</i>	59
2.2.6.6	<i>Métodos espectroquímicos</i>	60
2.2.7	Tipos de partículas de desgaste	61
2.2.7.1	<i>Partículas de desgaste por atrito (rubbing wear/normal wear)</i>	62
2.2.7.2	<i>Partículas de desgaste severo por deslizamento (severe sliding wear)</i>	63
2.2.7.3	<i>Partículas de desgaste por corte (cutting wear)</i>	64
2.2.7.4	<i>Partículas de desgaste por fadiga (fatigue wear)</i>	65
2.2.7.4.1	<i>Partículas de fadiga por rolamento (Rolling Fatigue)</i>	65
2.2.7.4.2	<i>Partículas de fadiga por engrenamento (gear systems fatigue)</i>	68
2.2.7.5	Partículas metálicas não ferrosas (nonferrous metals)	69
2.2.7.5.1	<i>Partículas de alumínio (aluminum particles)</i>	69
2.2.7.5.2	<i>Partículas de liga de cobre (copper alloy)</i>	70
2.2.7.5.3	<i>Partículas de liga de chumbo/estanho (lead/tin alloy)</i>	70
2.2.7.6	Óxidos ferrosos (ferrous oxides)	71
2.2.7.6.1	<i>Partículas de óxido vermelho (red oxides)</i>	72
2.2.7.6.2	<i>Partículas de óxido preto (black oxides)</i>	74
2.3	VIBRAÇÃO	75
2.3.1	Monitoramento de Integridade Estrutural	75
2.3.2	Sistema Imunológico Artificial	78
2.3.3	Algoritmo de Seleção Negativa	80
2.4	MÉTODO ESTATÍSTICO	82
2.4.1	Teste Q de Dixon	82
3	MATERIAIS E MÉTODOS	85
3.1	PROCEDIMENTOS	86
3.2	PARÂMETROS EXPERIMENTAIS	89
3.3	EXPERIMENTOS	89
3.3.1	Aquisição e processamento de sinais	93
3.3.2	Quantificação do desgaste	93
3.3.3	Espectrômetro de raios X	94
3.3.4	Monitor automático de partículas ferrosas	95
3.3.5	Filtragem por membrana celulósica	96
3.3.6	Microscópio óptico	97
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	98

4.1	BIOLUBRIFICANTES.....	99
4.1.1	Biograxa LGQ01.....	99
4.1.2	Biograxa LGQ02.....	103
4.1.3	Biograxa LGQ03.....	108
4.1.4	Biograxa LGQ04.....	112
4.1.5	Biograxa LGQ05.....	116
4.1.6	Biograxa LGQ06.....	120
4.1.7	Biograxa LGQ07.....	124
4.1.8	Biograxa LGQ08.....	128
4.1.9	Biograxa LGQ09.....	132
4.2	LUBRIFICANTES COMERCIAIS.....	136
4.2.1	Graxa para corrente Yourlub (Graxa Branca).....	136
4.2.2	Graxa FAG multiuso (Graxa Azul).....	140
4.3	ANÁLISE COMPARATIVA.....	144
4.4	ANÁLISE ARTIFICIAL DE SELEÇÃO NEGATIVA.....	146
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	156
5.1	CONCLUSÕES.....	156
5.2	TRABALHOS FUTUROS.....	157
	REFERÊNCIAS.....	158

1 INTRODUÇÃO

O avanço no desenvolvimento humano e o aumento na complexidade dos processos tecnológicos tornaram-se assuntos frequentemente debatidos nos últimos anos. Os receios sobre o uso de produtos derivados do petróleo aumentam com o esgotamento progressivo das reservas mundiais de combustíveis fósseis, e também devido aos impactos ambientais (OLIVEIRA, 2013; ZAINAL *et al.*, 2018; MANNEKOTE *et al.*, 2018).

Os combustíveis fósseis, por possuírem um alto valor energético, desempenham um papel importante no atendimento às demandas globais de energia há séculos (ZAINAL *et al.*, 2018). Assim, tornaram-se produtos estratégicos para o desenvolvimento das nações no mundo, com forte influência nas políticas internas e nas relações internacionais tanto para os países que possuem reservas como para os que não possuem (BRASIL, 2020).

A grande dependência atual e a possível escassez dos recursos de petróleo e gás natural no futuro (seja em quantidade ou áreas de disponibilidade) são grandes preocupações em todo o mundo. Devido às crescentes demandas de energia resultantes da industrialização e do crescimento populacional, o consumo cada vez maior dessas fontes de energia não renováveis é alarmante, pois o seu término terá um sério impacto na vida das pessoas (ZAINAL *et al.*, 2018).

Por esse motivo, os governos mundiais estão trabalhando para reduzir sua dependência de recursos energéticos importados (ZAINAL *et al.*, 2018). As questões ambientais associadas ao uso de produtos petrolíferos e as estratégias geopolíticas relativas à manipulação de petróleo bruto são as forças motrizes por trás da introdução de combustíveis e lubrificantes alternativos a partir de matérias-primas renováveis que podem contribuir para a organização vertical das economias nacionais (HEIKAL *et al.*, 2017).

Recursos energéticos alternativos, como bioetanol, biodiesel e biomassa, já foram aceitos ao redor do mundo por suas vantagens sobre os combustíveis convencionais, incluindo a oportunidade de independência energética. Agora, espera-se um crescimento semelhante para os biolubrificantes, como alternativas aos lubrificantes à base de petróleo para diferentes aplicações de nicho, especialmente na indústria automotiva (HEIKAL *et al.*, 2017; ZAINAL *et al.*, 2018).

A idéia de usar produtos óleo à base de animais e vegetais como lubrificante não é nova. No entanto, o uso desta tecnologia foi posta em espera, devido à abundância, melhorias subsequentes nas tecnologias de refino e baixo custo do petróleo (HONARY; RICHTER, 2011; ZAINAL *et al.*, 2018; MANNEKOTE *et al.*, 2018).

A elevada procura por biolubrificantes é impulsionada por vários fatores, tais como: conscientização ambiental do consumidor, diretrizes governamentais e demanda global por lubrificantes (CHAN *et al.*, 2018). Preocupações ambientais e regulamentos rigorosos sobre o uso de óleos minerais como base de lubrificantes são o resultado de seus resíduos tóxicos e de sua não biodegradabilidade (FOX; STACHOWIAK, 2007; ABDULBARI; AKINDOYO; MAHMOOD, 2015).

Toneladas de lubrificantes desperdiçados anualmente apresentam um grande risco para o ecossistema (ABDULBARI; AKINDOYO; MAHMOOD, 2015). Estima-se que mais de 50% de todos os lubrificantes utilizados no planeta entrem no ambiente devido a derramamentos, descarte inadequado e acidentes. Destes, mais de 95% são derivados do petróleo, o que causa sérios danos à natureza, já que contaminam o ar, o solo, a água e afetam a vida humana e vegetal em grande parte, pois permanecem não degradáveis por cem anos. (LUNA *et al.*, 2015; ABDULBARI; ZUHAN, 2018; MANNEKOTE *et al.*, 2018).

Os óleos vegetais, sendo renováveis, atóxicos e biodegradáveis, tornaram-se a principal escolha para aplicações de lubrificantes sensíveis ao meio ambiente. Estes apresentam alta porcentagem de biodegradação, ou seja, são desintegrados facilmente pela ação de microrganismos, e fornecem melhores desempenhos de lubrificação em termos de comportamento físico e tribológico. (LUNA *et al.*, 2015; FOX; STACHOWIAK, 2007; TALIB, RAHIM, 2016; MANNEKOTE *et al.*, 2018).

Um dos maiores desafios é o desenvolvimento de um material de base biodegradável universal que possa substituir os de base mineral. Os produtos biolubrificantes devem atender aos requisitos das normas internacionais em termos de renovabilidade, biodegradabilidade, toxicidade e desempenho técnico (FOX; STACHOWIAK, 2007; NAGENDRAMMA; KAUL, 2012; HEIKAL *et al.*, 2017; CHAN *et al.*, 2018).

1.1 MOTIVAÇÃO

Os problemas ambientais globais causados pelo consumo dos recursos naturais, e a poluição causada pelos produtos gerados resultaram em uma maior pressão política e fortes regulamentações a serem aplicadas tanto para os fabricantes quanto para os consumidores. Assim, a adoção de um desenvolvimento sustentável na produção oferece ao setor industrial um caminho para este crescer econômica, ambiental e socialmente (PUSAVEC; KRAJNIK; KOPAC, 2010).

Para isso, o elemento chave da sustentabilidade é a utilização prudente das fontes naturais. Isto significa usar fontes não renováveis de forma eficiente e desenvolver

alternativas para substituí-las no futuro, enquanto que usar as fontes renováveis de modo a não prejudicar a própria fonte ou causar poluição (PUSAVEC; KRAJNIK; KOPAC, 2010).

A partir do momento em que economizar energia e recursos, e reduzir as emissões de poluentes tornaram-se questões ambientais centrais, os lubrificantes passaram a atrair cada vez mais a conscientização pública. Entre 5.000 e 10.000 formulações diferentes de lubrificantes são necessárias para satisfazer mais de 90% de todas as suas aplicações, sendo o óleo mineral responsável por formar a base quantitativamente mais importante (MANG; DRESEL, 2007).

Óleos de base mineral são imensamente utilizados como lubrificantes nas aplicações industriais. Estima-se que 36,36 milhões de toneladas de lubrificantes foram consumidos no mundo em 2014, e que este volume tem uma projeção de crescimento para 43,87 milhões de toneladas em 2022 (GRAND VIEW RESEARCH, 2018). De acordo com Pusavec *et al.* (2010), cerca de 85 % do volume de lubrificantes utilizados na indústria de manufatura é de base mineral.

Devido ao crescimento na demanda de lubrificantes e a atual dependência nos óleos derivados do petróleo pelo setor industrial, o desenvolvimento, a produção e o uso de bases alternativas para os lubrificantes tornaram-se uma estratégia de mercado (SOUZA *et al.*, 2019).

As aplicações de lubrificantes de base mineral nas atividades industriais criam riscos significativos à saúde e ao meio ambiente. O reconhecimento desses perigos levou ao desenvolvimento de lubrificantes de base biológica. Estes são provenientes de fontes renováveis, mais biodegradáveis, menos tóxicos e, em alguns casos, podem apresentar melhores performances tribológicas quando comparados aos lubrificantes minerais (MADANHIRE; MBOHWA, 2016; SOUZA *et al.*, 2019).

Assim, os óleos de base vegetal são uma alternativa ambientalmente correta para substituir os lubrificantes convencionais (MANG; DRESEL, 2007). De fato, sempre foi a alternativa ao óleo mineral devido à sua superioridade em lubrificação, índice de viscosidade e resistência ao desgaste, além de mencionar a biodegradabilidade e sustentabilidade de sua matéria-prima (CHAN *et al.*, 2018).

Ainda, segundo Fox e Stachowiak (2007) e Souza *et al.* (2019), o melhor desempenho de alguns óleos vegetais comparados aos minerais é devido a presença de moléculas de triglicerídios que possuem em sua estrutura uma longa cadeia carbônica (ácidos graxos). Isto implica na geração de um filme lubrificante mais estável nas superfícies metálicas e com alta tenacidade.

Os óleos vegetais, apesar de apresentarem muitas características desejáveis, também possuem algumas deficiências quando considerados para uso em lubrificantes e graxas industriais (HONARY; RICHTER, 2011). As principais limitações são que eles apresentam baixa estabilidade termo-oxidativa e são insatisfatórios em baixas temperaturas (MADANHIRE; MBOHWA, 2016; ZAINAL *et al.*, 2018). No entanto, por meio de modificações químicas, reformulações aditivas e modificações genéticas a partir da semente oleaginosa, estas deficiências podem ser resolvidas (TALIB; RAHIM, 2016; CHAN *et al.*, 2018).

Além dos óleos lubrificantes, as graxas são muito utilizadas no setor industrial por apresentarem outras vantagens além da lubrificação. As graxas convencionais são formadas por uma combinação de óleo de origem petrolífera e um espessante vegetal, com isso apresentam uma biodegradabilidade limitada (GANGULE; DWIVEDI, 2001).

Com base na caracterização físico-química e no desempenho tribológico, verificou-se que o óleo vegetal tem um bom potencial para uso na graxa lubrificante (NAGENDRAMMA; KUMAR, 2015). Com isso, novas formulações passaram a ser desenvolvidas, onde tanto o óleo como o espessante são derivados de óleos vegetais. Estas biograxas possuem excelente biodegradabilidade e estão em conformidade com os requisitos de alto desempenho (DWIVEDI; SAPRE, 2002).

1.2 OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo realizar um estudo experimental técnico científico afim de analisar se através da integração de técnicas preditivas, tais como a análise de partículas de desgaste e o monitoramento dos sinais de vibração, é possível validar graxas de base vegetal (óleo de soja sintetizado) comparando-as com graxas de base mineral comercial.

Através da utilização de um tribômetro instrumentado do tipo pin-on-disk verificar se, mediante o uso de ensaios experimentais e análise de propriedades dos materiais, é plausível determinar os coeficientes de atrito, as temperaturas da superfície de contato e as quantificações de desgaste de pares tribológicos. Também, quantificar a concentração e a natureza das partículas ferromagnéticas presentes nas amostras, através de diferentes testes tribológicos.

Além disso, com a aquisição dos sinais de vibrações, utilizar um algoritmo de sistema imunológico artificial de seleção negativa, baseado em conceitos de Monitoramento de

Integridade Estrutural (SHM), capaz de identificar e classificar estes sinais em falhas ou não-falhas.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 MANUTENÇÃO

Todo sistema ou equipamento mecânico está sujeito a processos de deterioração. Esta deterioração leva ao aparecimento de defeitos que podem atrapalhar a continuidade e qualidade do serviço (produção) (LAGO, 2007). A quebra não prevista de uma máquina ou equipamento traduz-se por uma parada brusca, geralmente levando a grandes prejuízos e a perda de tempo de produção (CUNHA, 2005).

Para que a produtividade no setor industrial, constituído por uma diversidade de máquinas e equipamentos, tenha resultados positivos, é necessário que todos eles sejam mantidos nas melhores condições de funcionamento (LAGO, 2007).

Assim, todo sistema mecânico deverá sofrer, ao longo de suas vidas úteis, uma combinação de ações (técnicas ou administrativas, incluindo as de supervisão) necessárias para se manterem conservados ou restaurados de modo a poder desempenhar uma função requerida. Estas ações constituem aquilo a que se chama manutenção (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 1994).

Em outras palavras, a manutenção é definida como o conjunto de ações técnicas que permitem manter ou restabelecer um bem a um estado de operação específico ou, ainda, assegurar um determinado serviço (ARATO JÚNIOR, 2004).

A manutenção pode ser classificada basicamente em três tipos: manutenção corretiva, preventiva (sistemática) e preditiva (condicional).

A manutenção corretiva corresponde a uma atitude curativa, ou seja, efetua-se o conserto da máquina ou equipamento após a pane ou avaria. Isto implica na não necessidade de investimento em mão de obra qualificada, no entanto tem como consequências um custo de manutenção que aumenta à medida que os equipamentos vão envelhecendo, as quebras não previstas traduzem-se por uma parada imprevista, provocando grandes prejuízos devidos às perdas de produção, e exige um grande estoque de peças de reserva (ARATO JÚNIOR, 2004).

A manutenção preventiva estabelece um programa de inspeções e intervenções com intervalos fixos a partir de recomendações do fabricante, conhecimentos práticos sobre o equipamento e aplicação de critérios estatísticos. A vantagem é o aumento da produtividade, já que as operações de paradas são pré-definidas, permitindo um gerenciamento adequado da produção (ARATO JÚNIOR, 2004).

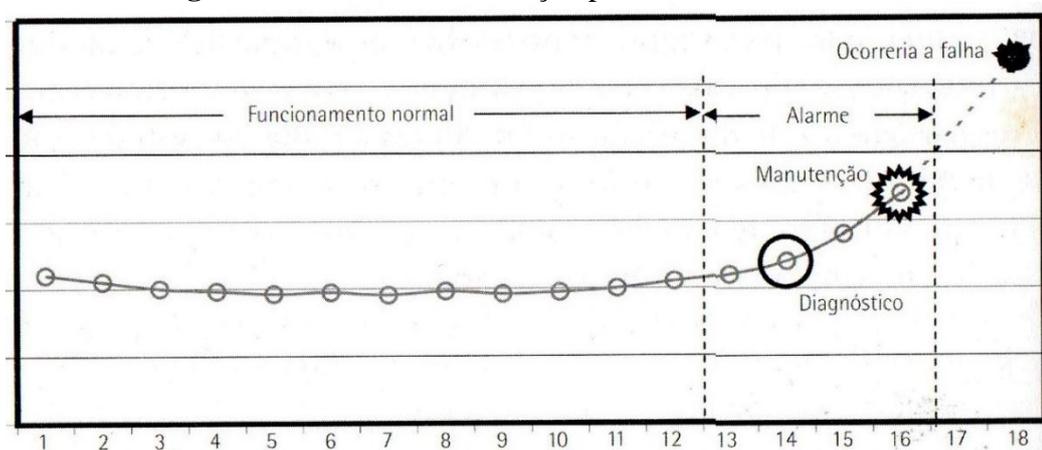
Segundo Arato Júnior (2004), no entanto, a manutenção preventiva apresenta certos inconvenientes, tais como: aumento no custo de produção, já que ele passa a englobar as perdas devidas às paradas, o processo de desmontagem, ainda que parcial, de um equipamento incita a substituição de peças, seja por quebras ou pela síndrome da precaução, e a prática de montagem/desmontagem aumenta o risco de introdução de novas avarias.

Já a manutenção preditiva baseia-se em algum tipo de informação reveladora do estado de degradação do sistema ou equipamento. As inspeções periódicas consistem em monitorar parâmetros, se a análise destes indicar a existência de um mau funcionamento, estima-se a tendência evolutiva do defeito e programa-se uma parada de correção (ARATO JÚNIOR, 2004).

A escolha pela manutenção preditiva significa que só haverá uma intervenção se os parâmetros de controle evoluírem significativamente para níveis considerados não admissíveis. As principais vantagens são: aumento de produtividade, diminuição do custo de produção devido às interrupções periódicas e diminuição da possibilidade de introdução de novos defeitos nas operações de montagem/desmontagem. No entanto, requer um elevado investimento em equipamentos para coleta e análise de dados, bem como mão de obra especializada (ARATO JÚNIOR, 2004).

Arato Júnior (2004) afirma que a prática da manutenção preditiva envolve três fases: detecção do defeito, estabelecimento de um diagnóstico e análise da tendência. A Fig. 1 apresenta um diagrama evolutivo envolvendo todas as fases. É importante ressaltar que nela não está representado o período de amaciamento do sistema, já que este não tem importância relevante para a manutenção condicional.

Figura 1 – Fases da manutenção preditiva ou condicional



Fonte: Arato Júnior (2004).

A detecção do defeito consiste na observação de que os valores medidos dos parâmetros de controle indicam uma evolução mais acelerada que a decorrente da degradação normal do equipamento.

O estabelecimento do diagnóstico é o resultado da análise dos valores dos parâmetros de controle, com base em modelos de desgaste e informações anteriores sobre o equipamento, origem e a gravidade de seus possíveis defeitos.

Já a análise da tendência consiste em ampliar o diagnóstico e prever quanto tempo se dispõe antes da parada forçada pela quebra propriamente dita. Nesta fase, o equipamento é submetido a uma vigilância estrita e se faz a programação do reparo.

Como a manutenção preditiva consiste em monitorar parâmetros que indicam o estado real de funcionamento dos sistemas mecânicos, os métodos empregados envolvem técnicas e procedimentos de medida, acompanhamento e análise desses parâmetros (ARATO JÚNIOR, 2004). Entre eles, os mais comuns são: sistemas especialistas, análise de vibrações e análise de lubrificantes.

Os sistemas especialistas são os programas computacionais (*softwares*) especializados utilizados para o processamento de informações, evitando assim a sequência rígida de trabalho das soluções algorítmicas por parte do homem.

O princípio de análise de vibrações baseia-se na ideia de que as estruturas das máquinas, excitadas pelos esforços dinâmicos, respondem com sinais vibratórios cuja frequência é igual à frequência de excitação. Ao considerar a utilização do equipamento e sua deterioração, tem-se uma modificação na distribuição da “energia vibratória”, tendo como consequência um aumento abrupto do nível de vibrações (ARATO JÚNIOR, 2004). Instrumentação adequada, bem como um processamento de sinais efetivo são peças fundamentais para um bom resultado da análise de vibrações (SILVA, 2015).

Por fim, a análise de lubrificantes tem por objetivo informar sobre o desgaste dos componentes lubrificados. Como estes contaminam o fluido lubrificante com os materiais provenientes de seu desgaste, a metodologia consiste em medir e analisar a sua taxa de contaminação. Identificando a contaminação por partículas sólidas, o material e sua dimensão, é possível verificar a presença de um mau funcionamento e sua origem (ARATO JÚNIOR, 2004). A análise de lubrificantes é feita por meio de técnicas laboratoriais que envolvem reagentes, instrumentos e equipamentos (LAGO, 2007).

2.2 TRIBOLOGIA

A palavra tribologia é derivada das palavras gregas “tribos”, que significa atrito, e “logos”, que significa estudo. Esta foi definida em 1966, no Reino Unido, como: a ciência e tecnologia da interação de superfícies em movimento relativo e assuntos e práticas relacionados (STOETERAU, 2004; MANG; DRESEL, 2007; KHONSARI; BOOSER, 2017).

Em outras palavras, é a ciência que estuda o atrito entre os corpos em movimento, o desgaste como efeito natural deste fenômeno e a lubrificação como um meio para evitar este desgaste (LUDEMA, 1996; ZAINAL *et al.*, 2018).

O ramo da tribologia envolve:

- Os campos da mecânica, física, química, materiais e os conhecimentos em lubrificação, atrito e desgaste para prever o comportamento de sistemas físicos.
- Quando a tribologia considera organismos vivos ela é designada por biotribologia e incorpora princípios da medicina e das ciências biológicas.

Essa ciência está ganhando cada vez mais espaço nas engenharias de projetos de novos produtos e nas engenharias de manutenção das empresas. A busca pela competitividade tem proporcionado o surgimento de novos materiais, novas tecnologias de tratamentos de superfícies e novas tecnologias de lubrificação (STOETERAU, 2004).

Gahr (1987) e Mang e Dresel (2007) definem que em uma situação tribológica ocorre a interação entre duas superfícies em um determinado ambiente. Assim, um tribossistema consiste de quatro elementos:

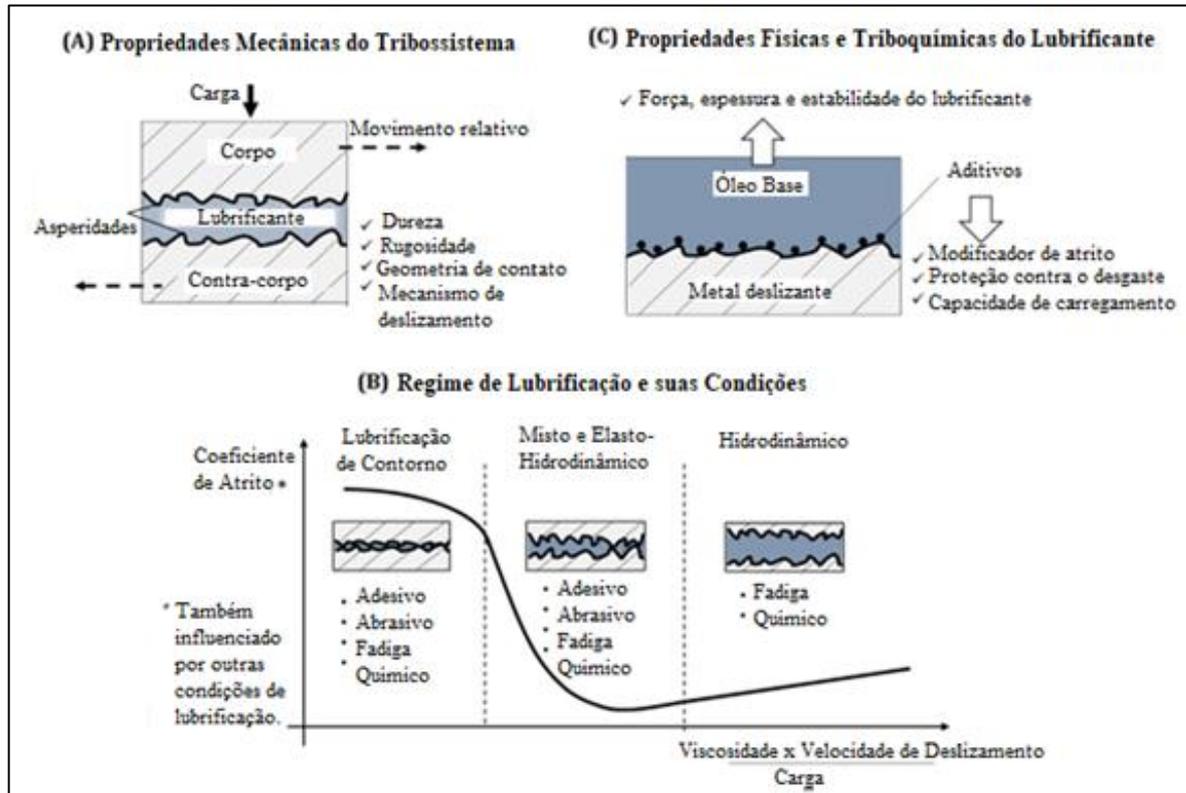
1. Corpo sólido;
2. Contra-corpo, podendo este ser sólido, líquido, gasoso ou uma mistura destes;
3. Elemento interfacial, que são os lubrificantes e/ou contaminantes; e
4. Ambiente.

O desempenho tribológico na lubrificação diz respeito à lubrificação, fricção e desgaste. De um modo geral, a lubrificação está associada à formação de um filme lubrificante (ou tribofilme) em superfícies deslizantes. Uma boa lubrificação reduz os contatos diretos das asperezas da superfície e, portanto, reduz o atrito e a perda de energia (CHAN *et al.* 2018).

Os três parâmetros tribológicos básicos são: as propriedades mecânicas de um tribossistema, o regime de lubrificação e suas condições, e também as propriedades físicas e triboquímicas do lubrificante (CHAN *et al.* 2018).

A Fig. 2 ilustra os detalhes de cada parâmetro e na sequência são explanados.

Figura 2 – Três parâmetros básicos que afetam os comportamentos de atrito e desgaste em um tribossistema lubrificado



Fonte: Adaptado de Chan *et al.* (2018).

As características mecânicas de um sistema tribológico podem ser descritas como a dureza do material, a rugosidade da superfície, a geometria de contato e o mecanismo de deslizamento da parte que interage (corpo sólido) e de sua contraparte (contra-corpo), conforme apresentado na Fig. 2 (A).

As condições operacionais de qualquer tribossistema desempenham um papel significativo na caracterização do filme lubrificante e, posteriormente, do comportamento tribológico. Existem três regimes de lubrificação: contorno (*boundary lubrication*), misto e elasto-hidrodinâmico (EHL) e hidrodinâmico (*hydrodynamic lubrication*), conforme representado na Fig. 2 (B).

A lubrificação de contorno geralmente ocorre com alta carga de contato ou baixa velocidade de deslizamento, por meio da qual um tribofilme fino ou instável é formado, fazendo com que as superfícies de contato esfreguem umas nas outras e gerem elevados atrito e desgaste (CHAN *et al.* 2018).

Um aumento adicional na velocidade de deslizamento ou diminuição da carga de contato muda a lubrificação para o regime misto - EHL e depois para o regime de lubrificação hidrodinâmico. Juntamente com essa transição, a fricção associada e a taxa de desgaste diminuem desde que as superfícies de contato agora são separadas por um filme lubrificante mais espesso devido à elevação hidrodinâmica (CHAN *et al.* 2018).

Chan *et al.* (2018) ressalta que uma lubrificação de contorno tem um valor de coeficiente de atrito (μ) maior que 0.1, enquanto a lubrificação mista - EHL produz um μ na faixa de 0.01– 0.1, e a lubrificação hidrodinâmica fornece um μ menor que 0.01.

Já as propriedades físicas e triboquímicas de qualquer lubrificante são os parâmetros mais cruciais para o desempenho tribológico, conforme mostrado na Fig. 2 (C). Tendo em vista as propriedades físicas do lubrificante, a viscosidade e sua relação com a temperatura e a pressão são as principais propriedades responsáveis pela espessura do tribofilme e, finalmente, pelo desempenho tribológico (CHAN *et al.* 2018).

Por outro lado, no que diz respeito às propriedades triboquímicas, lubrificação, proteção contra desgaste e capacidade de carga são exibidas pelos chamados aditivos. Normalmente, estes são empregados para minimizar o desgaste e aprimorar a lubrificação em regimes de lubrificação de contorno e de lubrificação mista – EHL (CHAN *et al.* 2018).

Stoeterau (2004) ainda ressalta que a interação entre duas superfícies resulta em:

(1) uma dissipação de energia que é a resistência ao movimento representada pelo coeficiente de atrito. Essa dissipação resulta em calor liberado no contato e uma certa quantidade de ruído; e

(2) durante o processo de escorregamento relativo, ocorrem modificações nas características básicas das superfícies. Elas podem se tornar mais lisas ou rugosas, ter suas propriedades físicas alteradas e podem ter material removido através do processo de desgaste.

Essas modificações podem ser benéficas (amaciamento – condição de operação próxima a ideal) ou desastrosas (falha – substituição da peça). Assim, pode-se concluir que nem sempre o atrito e o desgaste são desvantajosos. Em muitas aplicações em engenharia, emprega-se o atrito para preencher certas funções requeridas: Freios, embreagens, rodas diretoras de carros e trens funcionam devido à existência de atrito. Da mesma forma, o desgaste é, algumas vezes, vantajoso. Neste caso, o desgaste inicial de um sistema mecânico resulta em uma melhor acomodação das peças (STOETERAU, 2004).

Uma outra definição importante em tribologia é em relação as superfícies técnicas dos materiais. Embora as superfícies normalmente sejam consideradas como planos lisos, quando avaliadas microscopicamente, elas se tornam mais complexas, apresentando geometrias com

picos e vales (as quais definem o termo rugosidade), e também, propriedades físicas e químicas raramente uniformes através da espessura do material (STOETERAU, 2004).

2.2.1 Tribômetro

Testes tribológicos são muito importantes e altamente indispensáveis na indústria (BHUSHAN, 2013; YING; YUPENG, 2017). Esta ciência pode ajudar a definir o planejamento de rotinas de manutenção preditiva, bem como analisar propriedades tribológicas de novos materiais de engenharia, tais como polímeros e cerâmicas (SILVA *et al.*, 2006; LARSON; TIMPE, 2017).

Ensaio tribológicos são realizados em um tribômetro. Um comumente utilizado para avaliar com precisão o comportamento do desgaste pelo deslizamento de pares de materiais é o pino/esfera sobre disco (*pin/ball-on-disk*) (BAYER, 2004).

Este equipamento tem sido referenciado como um dos que melhor representa o estudo do atrito e do desgaste de materiais, e que apresenta melhor reprodutibilidade dos resultados em procedimentos laboratoriais (RAMOS *et al.*, 2014).

A realização de ensaios de desgaste de diferentes materiais através de um *pin on disk* é regida pela norma americana ASTM G99: *Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus*. Os parâmetros de controle são: carga (N), velocidade (m/s), distância (m), temperatura (°C) do pino e/ou do disco, e atmosfera (temperatura do laboratório, umidade relativa, lubrificante, entre outros).

As amostras preparadas devem resistir às tensões impostas durante o teste sem falha ou flexão excessiva. Além disso, os materiais testados devem ser descritos por dimensões, acabamento superficial, tipo de material, forma, composição, microestrutura, processos de tratamento e dureza. A amostra do pino tem forma cilíndrica ou esférica, o diâmetro varia entre 2 a 10 mm. Para o disco o diâmetro pode variar de 30 a 100 mm com uma espessura na faixa de 2 a 10 mm. As amostras devem ter um bom acabamento superficial, recomenda-se uma rugosidade de até 0,1 μm na média aritmética (Ra) (ASTM G99, 2017).

As premissas para atender o projeto são: o pino deve ser pressionado contra o disco por uma carga específica (força normal), normalmente por meio de uma alavanca com massas fixadas a ela. Os resultados de desgaste são obtidos realizando ensaios para uma determinada distância de deslizamento, bem como valores de carga e velocidade, sendo que estas podem variar entre 60 e 600 rpm (ASTM G99, 2017).

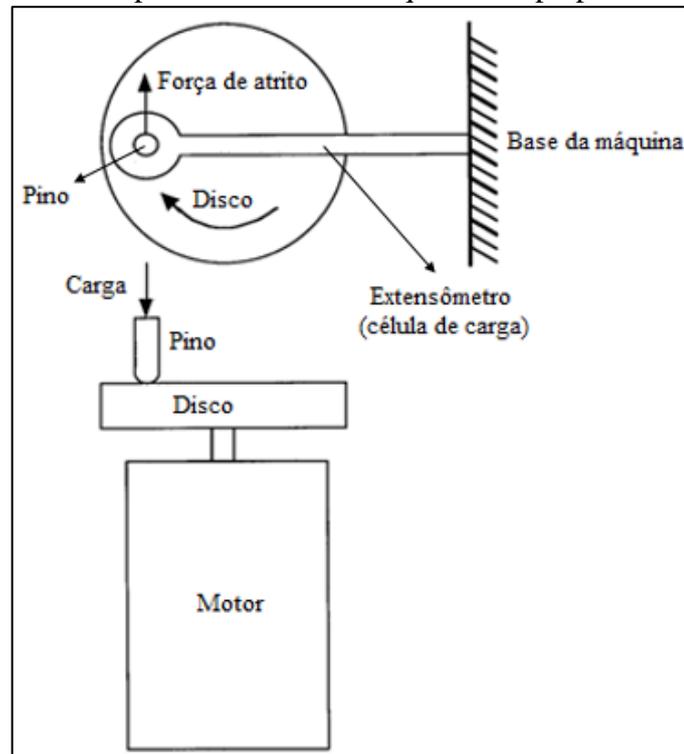
Além disso, a máquina deve ser equipada com um contador de revolução que irá registrar o número de ciclos do disco e, preferencialmente, ser capaz de desligar a máquina após um certo número de revoluções pré-selecionado (ASTM G99, 2017).

O sistema também deve ser capaz de medir a força de atrito. Estas medições têm sido feitas através de diferentes formas de instrumentos (ARCHARD, 1958). No entanto, com o desenvolvimento tecnológico, tornou-se possível medir o coeficiente de atrito com alta precisão em condições dinâmicas. Embora existam diferentes dispositivos (sensores) de medição de força de atrito, o extensômetro é o mais utilizado devido à sua simplicidade, confiabilidade e facilidade de calibração (BHUSHAN, 2000).

Além dos muitos sistemas de detecção disponíveis, também existem vários projetos de máquinas de medição de força de atrito. Estas podem ser classificadas em função de faixa de carga, faixa de velocidade, atmosfera de funcionamento, tipo de movimento, tipo de superfície deslizante (esférica, cilíndrica ou plana), entre outros (BHUSHAN, 2000).

No caso da máquina pino sobre disco, um pino de ponta arredondada é mantido por um suporte com um transdutor de força e desliza contra um disco. Este geralmente é movido por um sistema de acionamento, e está acoplado diretamente à um motor. A Fig. 3 ilustra este tipo de máquina (BHUSHAN, 2000).

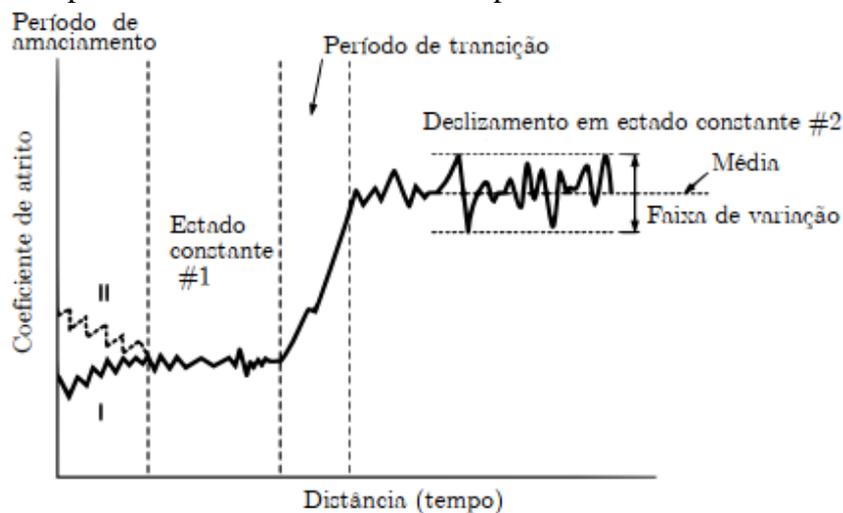
Figura 3 – Componentes de uma máquina do tipo pino sobre disco



Fonte: Adaptado de Bhushan (2000).

A medição do coeficiente de atrito em função da distância de deslizamento tem sido objeto de muitos estudos para determinar a influência de diversos parâmetros tribológicos. De acordo com Bhushan (2013), durante o deslizamento, ocorrem mudanças nas condições das superfícies em contato que afetam as propriedades de atrito e desgaste. Após um determinado período, chamado período de amaciamento, a força de atrito geralmente se estabiliza e têm-se o estado constante de deslizamento. Normalmente, após mais um período de deslizamento, o atrito aumenta novamente e atinge um novo patamar, conforme ilustra a curva em forma de S na Fig. 4.

Figura 4 – Coeficiente de atrito em função da distância de deslizamento com uma curva típica em forma de S mostrando o período de amaciamento



Fonte: Adaptado de Bhushan (2013).

O formato das curvas de atrito pode ser afetado pelos tipos de materiais das interfaces em contato e pelas condições de operação. Bhushan (2013) ilustra na Fig. 5 a seguir, quatro casos hipotéticos em que o atrito pode aumentar em diferentes padrões, sendo:

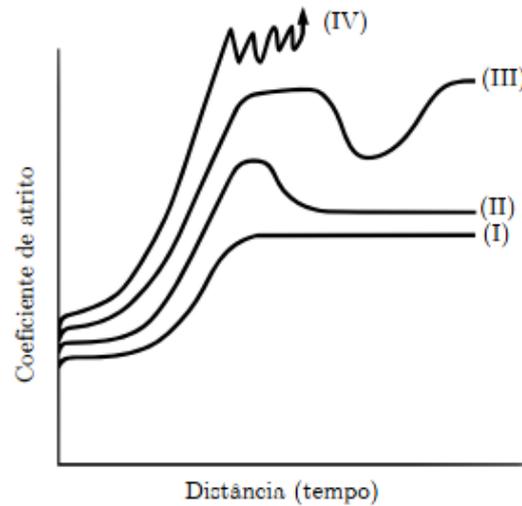
(I) o atrito permanece em seu valor inicial por algum tempo e aumenta lentamente para outro valor no estado constante de deslizamento;

(II) após permanecer em seu valor inicial por um tempo, o atrito atinge um valor alto e depois decai para um valor menor em seu estado constante (porém maior que o valor inicial);

(III) o atrito pode atingir um valor alto e permanecer nesse estado por um tempo, entrar em um período de transição para um valor menor e depois retornar novamente para o valor alto;

(IV) o atrito pode apresentar comportamentos aleatórios.

Figura 5 – Quatro casos hipotéticos de coeficientes de atrito



Fonte: Adaptado de Bhushan (2013).

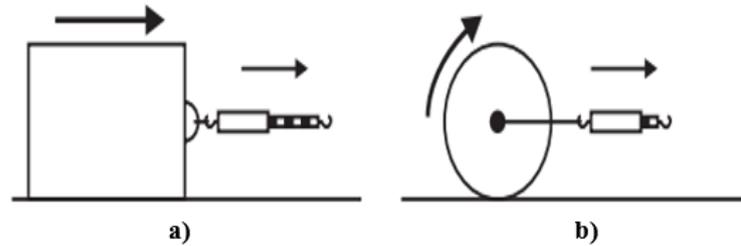
Em todos os casos, o coeficiente de atrito atinge um valor alto após algum período de deslizamento. Metais idênticos entre si exibem o comportamento mostrado no caso (I). A queda no coeficiente de atrito no caso (II) está associada à suavização das duas superfícies duras que sofrem deformação plástica. No caso (III), a queda no atrito nos contatos plásticos está associada à ejeção de partículas de desgaste, e um aumento subsequente está associado à geração e aprisionamento destas partículas. Por último, um aumento significativo no atrito para um valor inaceitavelmente alto em um curto período, conforme o caso IV, está associado a um par tribológico ruim (BHUSHAN, 2013).

Assim, através de um tribômetro, é possível determinar e estudar o atrito e o comportamento do desgaste nos materiais, com variação de tempo e distância, pressão de contato, velocidade, temperatura, umidade e lubrificação.

2.2.2 Atrito e desgaste

O atrito é a força que ocorre na interface entre dois corpos em contato, normalmente em movimento relativo de deslizamento ou rolamento, de acordo com a Fig. 6 a seguir.

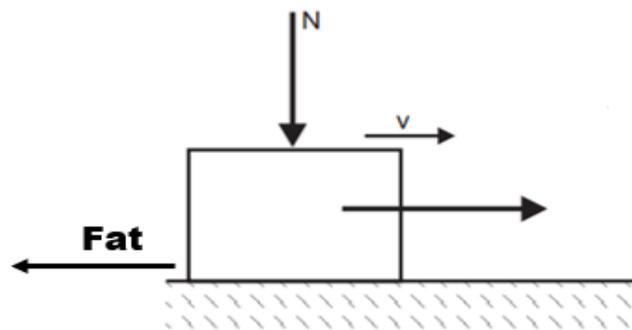
Figura 6 – a) Atrito por deslizamento e b) Atrito por rolamento



Fonte: Adaptado de Mang e Dresel (2007).

Esta força mecânica é responsável por resistir (atrito dinâmico ou cinético) ou dificultar o movimento (atrito estático). Além disso, é tangencial à superfície e sua direção é oposta ao movimento, conforme a Fig. 7 (LUDEMA, 1996; BAYER, 2004; MANG; DRESEL, 2007; BHUSHAN, 2013).

Figura 7 – Representação da força de atrito



Fonte: Adaptado de Mang e Dresel (2007).

No entanto, o atrito não é considerado uma propriedade material, mas sim uma resposta do sistema (BHUSHAN, 2013). Por isso, é geralmente descrito em termos de um coeficiente, chamado coeficiente de atrito, que é a razão entre a força de atrito (Fat) e a força normal (N) aplicada aos corpos (LUDEMA, 1996; BAYER, 2004). Este coeficiente está representado na Eq. (1).

$$\mu = \frac{Fat}{N} \quad (1)$$

Em situações envolvendo contato deslizante ou rolante, outro termo associado, além do atrito é o desgaste. Este é um dos problemas industriais mais frequentes que conduz a substituição de componentes em equipamentos mecânicos. Apesar de ser raramente

catastrófico, ele reduz a eficiência de operação através do aumento da perda de potência e consumo de lubrificantes (RAMOS *et al.*, 2014).

O desgaste pode ser definido como um dano à superfície ou a perda progressiva de material, resultado estas de interações mecânicas e/ou químicas entre duas superfícies em contato lubrificadas ou não (MANG; DRESEL, 2007; BHUSHAN, 2013). Assim como o atrito, o desgaste também não é considerado uma propriedade material, porém uma resposta do sistema (BHUSHAN, 2013).

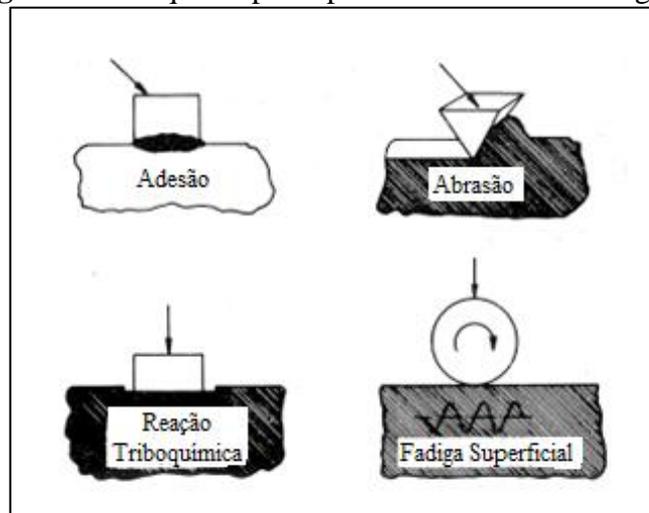
Segundo Chan *et al.* (2018), três tipos de desgastes mecânicos podem surgir sempre que houver contato de aspereza da superfície durante a atividade de deslizamento: abrasão, adesão e fadiga. Além disso, reações triboquímicas (oxidação e corrosão, por exemplo) são outros fenômenos importantes que influenciam no desgaste (MANG; DRESEL, 2007).

Em suma, o desgaste abrasivo é produzido através da remoção de volume de material por asperidades duras na superfície deslizante, o desgaste adesivo é o resultado de deformação plástica e forte ligação dos materiais da interface, e o desgaste por fadiga ocorre devido ao enfraquecimento dos materiais da superfície após contato repetido com alta tensão local (CHAN *et al.*, 2018).

Cada mecanismo de desgaste obedece suas próprias leis e, em muitas ocasiões, um tipo age de tal modo que influencia os outros. Desta forma, na análise de uma situação complexa, é crucial encontrar a causa primária do desgaste (BHUSHAN, 2013; KHONSARI; BOOSER, 2017).

A Fig. 8 apresenta os quatro principais mecanismos de desgaste e na sequência serão apresentados com maiores detalhes.

Figura 8 – Os quatro principais mecanismos de desgaste



Fonte: Gahr (1987).

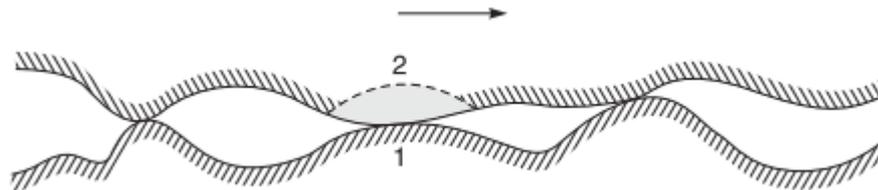
2.2.2.1 Desgaste adesivo

Quando avaliadas microscopicamente, as superfícies dos materiais não são lisas, existem picos e vales (asperidades) e quando duas superfícies estão em movimento relativo, as regiões de contato dessas asperidades (pontos de contato) passam a concentrar a pressão de contato e o aquecimento por atrito (STOETERAU, 2004).

No caso de mecanismo de desgaste por adesão, nas regiões dos pontos de contato, interações moleculares e atômicas criam condições favoráveis para arrancar partículas de material das faces de contato quando aplicada uma força de cisalhamento. Isto acontece pela formação de uma junta pontual entre as duas superfícies, um processo que é frequentemente chamado de soldagem a frio (GAHR, 1987; MANG; DRESEL, 2007; KHONSARI; BOOSER, 2017).

Normalmente, este tipo de desgaste ocorre em superfícies de materiais semelhantes que sofrem altas pressões e temperaturas nas asperidades resultando em uma deformação plástica, ocasionando transferências de material (MANG; DRESEL, 2007; BHUSHAN, 2013).

Figura 9 – Modo de desgaste adesivo



Fonte: Bhushan (2013).

Segundo Archard (1953, 1986) e Archard e Hirst (1956), considerando que duas superfícies estão em contato por deslizamento e sob determinada carga aplicada N , se durante uma interação de aspereza, as asperidades se deformam plasticamente sob a carga aplicada e que, em cada evento de unidade, exista uma probabilidade definida de que uma partícula de desgaste seja produzida, então a teoria do atrito por adesão afirma que o volume de material desgastado por unidade de deslizamento (w) será proporcional à área real de contato (A_r), conforme Eq. (2).

$$w = K * A_r \quad (2)$$

Onde w é a taxa de desgaste expressa como volume de material desgastado por unidade de deslizamento (m^3/m), A_r é a área real de contato (m^2) e K é a constante de proporcionalidade ou coeficiente de desgaste.

As Eq. (3) e (4) descrevem, respectivamente, o volume de material desgastado por unidade de deslizamento (w) e a área real de contato (A_r).

$$w = \frac{VL}{sd} \quad [m^2] \quad (3)$$

Sendo que VL representa a perda de volume (m^3) e sd é a distância de deslizamento (m).

$$A_r = \frac{N}{H} \quad [m^2] \quad (4)$$

Onde N é a força normal (N) e H é a dureza do material (N/m^2).

Assim, uma expressão matemática que representa o cálculo do coeficiente de desgaste (K) é definida pela Eq. (5).

$$K = \frac{w}{A_r} = \frac{\frac{VL}{sd}}{\frac{N}{H}} \quad \left[\frac{m^3/m}{N/N/m^2} \right] \quad (5)$$

Simplificando:

$$K = \frac{VL * H}{sd * N} \quad (6)$$

Segundo a literatura, os valores obtidos para o coeficiente de desgaste são baixos. Ludema e Ajayi (2018) apresentam uma grande faixa de valores para K , sendo este variando entre 10^{-9} a 10^{-4} . Archard (1986) afirma que os valores de K variam na faixa de 10^{-6} a 10^{-3} . Já Bhushan (2013) afirma que os valores de K variam entre 10^{-8} a 10^{-4} , para desgaste leve, e entre 10^{-4} a 10^{-2} para desgaste severo.

Isso significa que, embora todos os contatos de aspereza contribuam para o atrito, apenas uma fração muito pequena destes contatos resultam em desgaste. Portanto, o atrito é

determinado através das interações superficiais, no entanto o desgaste corresponde pela chance dos contatos entre as asperidades resultar em ruptura (ARCHARD, 1953, 1986; ARCHARD; HIRST, 1956; LUDEMA; AJAYI, 2018).

Ainda, de acordo com Archard (1953, 1986) e Archard e Hirst (1956), a taxa de desgaste de volume de material removido pela distância de deslizamento (φ), cuja unidade de medida é m^3 ou mm^3 , é diretamente proporcional tanto ao carregamento (N) quanto a distância de deslizamento (sd), e inversamente proporcional à dureza do material (H). Assim, a Eq. (7) representa esta taxa de desgaste.

$$\varphi = K * \frac{N * sd}{H} \quad \left[\frac{N \cdot m}{N/m^2} \right] \quad (7)$$

Além disso, a taxa de desgaste mencionada acima pode ser demonstrada em função do tempo (γ), cuja unidade de medida é m^3/s ou mm^3/s . Esta taxa de desgaste foi proposta por Ludema e Ajayi (2018) e está demonstrada na Eq. (8).

$$\varphi = K * \frac{N * V}{H} \quad \left[\frac{N \cdot (m/s)}{N/m^2} \right] \quad (8)$$

Sendo V a velocidade de deslizamento (m/s).

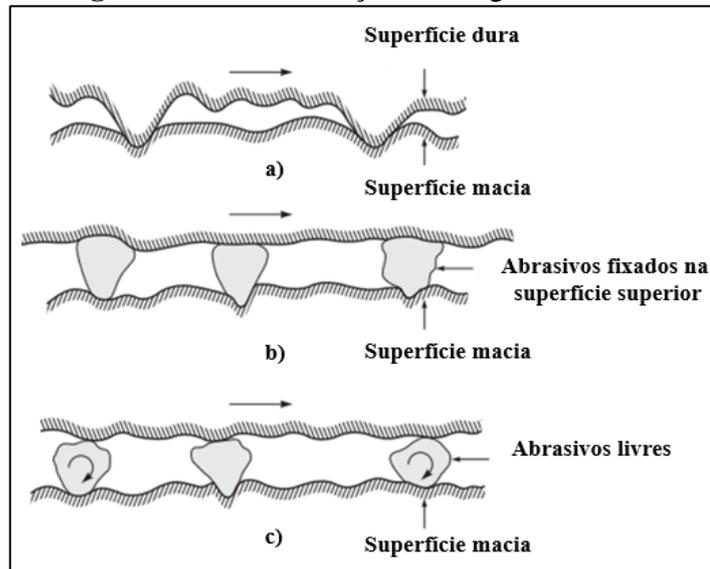
2.2.2.2 Desgaste abrasivo

O desgaste abrasivo ocorre quando asperidades de uma superfície dura ou de partículas duras deslizam sobre uma superfície mais macia e danificam a interface por deformação plástica ou fratura. Este também pode ocorrer quando partículas duras e abrasivas externas entram no sistema tribológico (GAHR, 1987; MANG; DRESEL, 2007; BHUSHAN, 2013; KHONSARI; BOOSER, 2017).

O desgaste abrasivo pode ser classificado basicamente em duas formas: abrasão de dois ou três corpos, conforme a Fig. 10 a seguir. No primeiro caso, tem-se uma superfície de maior dureza que a outra, por exemplo, em operações mecânicas, como retificação, corte e usinagem (Fig. 10a). No segundo caso, a superfície dura é um terceiro corpo, geralmente uma pequena partícula de abrasivo, presa entre as duas outras superfícies e suficientemente mais dura, para que seja capaz de abrasar uma ou ambas as superfícies correspondentes, por

exemplo, no polimento e polimento com abrasivo livre (Fig. 10b e 10c) (BHUSHAN, 2013; KHONSARI; BOOSER, 2017).

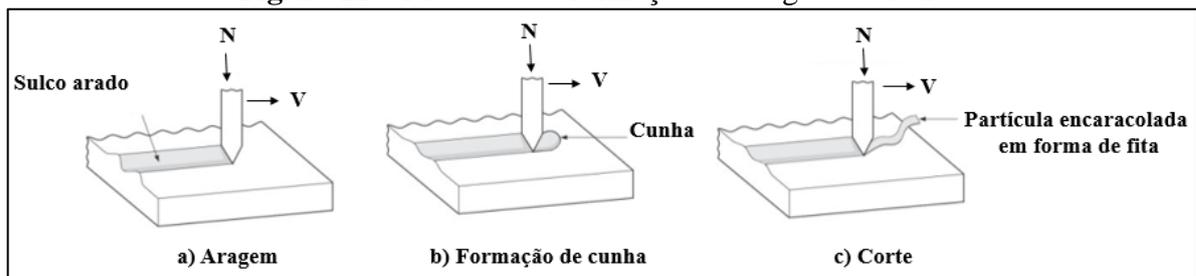
Figura 10 – Classificação do desgaste abrasivo



Fonte: Adaptado de Bhushan (2013).

A remoção de material de uma superfície via deformação plástica durante a abrasão pode ocorrer por diversos modos de deformação: aragem, formação de cunha e corte, de acordo com a Fig. 11.

Figura 11 – Modos de deformação do desgaste abrasivo



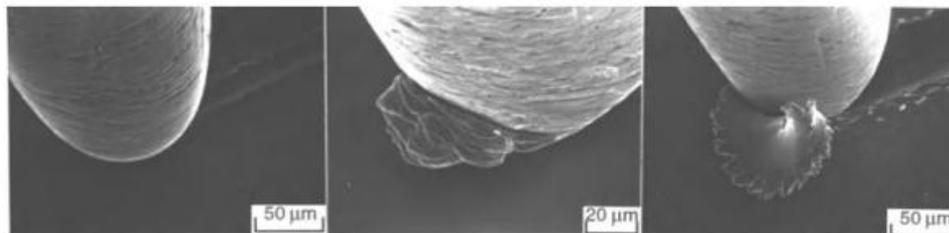
Fonte: Adaptado de Bhushan (2013).

A aragem resulta em uma série de ranhuras como resultado do fluxo plástico do material mais macio. Neste processo, o material é deslocado da ranhura para os lados sem a remoção de material. No entanto, após a superfície ter sido lavrada várias vezes, a remoção do material pode ocorrer por um mecanismo de fadiga superficial. No caso de formação de cunha, uma ponta abrasiva abre uma ranhura e uma parte do material é deslocado para os lados e o restante aparece como uma cunha a sua frente (BHUSHAN, 2013).

Já no modo de deformação por corte, um abrasivo com grande ângulo de ataque abre uma ranhura e remove material na forma de partículas de detritos descontínuos ou em forma de fita semelhantes às produzidas em uma operação de usinagem. Esse processo resulta em uma grande remoção de material e o material deslocado em relação ao tamanho da ranhura é muito pequeno (BHUSHAN, 2013).

A Fig. 12 representa os três modos de deformação para materiais dúcteis. Ainda segundo Bushan (2013), os fatores de controle para os três modos de deformação são: ângulo de ataque ou grau de penetração e a resistência ao cisalhamento da interface.

Figura 12 – Modos de deformação do desgaste abrasivo



a) Aragem

b) Formação de cunha

c) Corte

Fonte: Bhushan (2013).

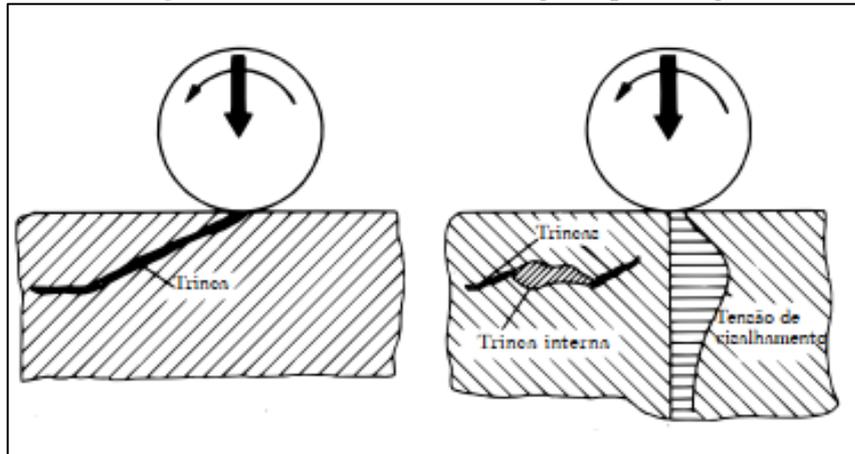
Equações matemáticas para o desgaste adesivo foram desenvolvidas, no entanto não são apresentadas neste trabalho, porém podem ser encontradas em Bhushan (2013) e Khonsari e Booser (2017).

2.2.2.3 Desgaste por fadiga superficial

Mecanismos de desgaste adesivo e abrasivo ocorrem durante o contato físico direto entre duas superfícies em movimento relativo. Se estas são separadas por um filme lubrificante, e partículas abrasivas são excluídas, esses mecanismos de desgaste não funcionam (BHUSHAN, 2013).

Devido principalmente ao movimento de rolamento, o contato entre as asperezas faz com que a tensão de cisalhamento varie de zero a um valor máximo repetidamente, produzindo tensões cíclicas abaixo da superfície, que provocam o surgimento de trincas internas, acarretando em uma falha por fadiga do material (GAHR, 1987; MANG; DRESEL, 2007; BHUSHAN, 2013; KHONSARI; BOOSER, 2017). A Fig. 13 a seguir ilustra o mecanismo de desgaste por fadiga.

Figura 13 – Mecanismo de desgaste por fadiga

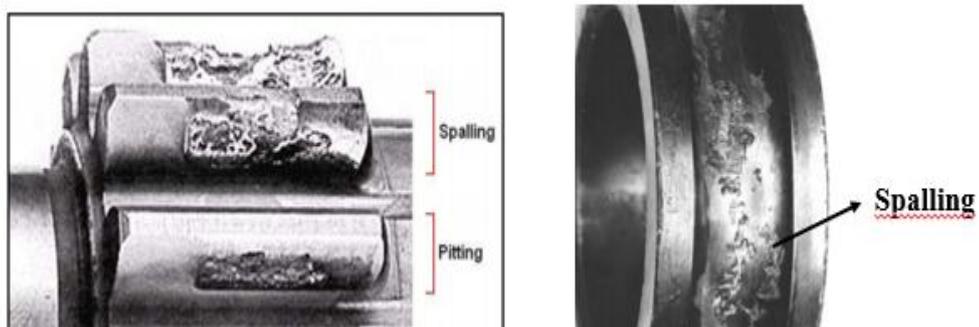


Fonte: Adaptado de Gahr (1987).

Cunha (2005) afirma que abaixo da superfície pode se desenvolver uma trinca que se propaga e ao chegar à superfície, a lasque e produza partículas de desgaste macroscópicas com a correspondente formação de covas (*pitting*) ou lascamento (*spalling*).

Pitting origina-se com trincas superficiais, e tem, relativamente, uma pequena área superficial. *Spalling* origina-se com trincas sub-superficiais, que são lascas finas de material de superfície (CUNHA, 2005). A Fig. 14 contém exemplos deste mecanismo de desgaste provocado em engrenagens e rolamentos.

Figura 14 – Falhas superficiais por crateração (*pitting*) e lascamento (*spalling*) devido ao desgaste por fadiga



Fonte: Adaptado de Norton (2013) e Bhushan (2013).

O tempo para falha da fadiga depende da amplitude das tensões de cisalhamento reversas, das condições de lubrificação da interface e das propriedades de fadiga dos materiais rolantes (BHUSHAN, 2013). Rolamentos de esferas e de roletes, como também engrenagens e cames, são exemplos onde observa-se o mecanismo de desgaste por fadiga (LAGO, 2007).

Novamente, expressões matemáticas para o mecanismo de desgaste por fadiga superficial foram desenvolvidas, no entanto não são apresentadas neste trabalho, porém podem ser encontradas em Bhushan (2013).

2.2.2.4 Desgaste por reações triboquímicas

Quando o ambiente externo reage quimicamente com as superfícies, seu contato deslizante pode produzir desgaste corrosivo (ou químico). Este ocorre em duas fases, sendo que a fase inicial envolve um ataque corrosivo na superfície (idêntica à corrosão comum), e a segunda consiste em desgastar essa superfície corroída (KHONSARI; BOOSER, 2017).

Bhushan (2013) ainda afirma que no ar, como o meio corrosivo mais dominante é o oxigênio, o desgaste químico é geralmente conhecido como desgaste oxidativo. Neste caso, as partículas de desgaste consistem em grande parte de óxidos que foram formados na superfície e removidos por atrito (GAHR, 1987).

Assim, as reações químicas que ocorrem em uma situação tribológica são denominadas triboquímicas e a remoção destas camadas de reação constitui o mecanismo de desgaste triboquímico (MANG; DRESEL, 2007).

O desgaste triboquímico pode ser caracterizado pelo atrito entre duas superfícies sólidas que reagem com um meio ambiente corrosivo, podendo ser gasoso ou líquido. O processo de desgaste prossegue pela remoção contínua e nova formação de camadas reativas nas superfícies de contato (GAHR, 1987). Segundo Bhushan (2013), este desgaste requer reação química (corrosão), atrito e remoção de produtos metálicos e de reação química das superfícies em contato.

A Fig. 15 a seguir foi fotografada através de um microscópio eletrônico de varredura (MEV) e ilustra um rolamento corroído.

Figura 15 – Rolamento após desgaste químico



Fonte: Bhushan (2013).

2.2.3 Lubrificação

Quando uma superfície desliza sobre a outra, haverá sempre alguma resistência ao movimento. Esta força de resistência é conhecida como atrito. Qualquer substância que reduza o atrito é conhecida como lubrificante, e este pode ser sólido, líquido, pastoso ou gasoso (KHONSARI; BOOSER, 2017).

Os lubrificantes são essenciais para quase todos os aspectos das máquinas modernas. Como o próprio nome indica, eles são utilizados para lubrificar superfícies em interação, a fim de facilitar o movimento dos componentes e reduzir/controlar o atrito e o desgaste (MANG; DRESEL, 2007; ABDULBARI; ZUHAN, 2018; MANNEKOTE *et al.*, 2018; ZAINAL *et al.*, 2018).

Além disso, apresentam outras finalidades, tais como: refrigeração (remoção de calor), limpeza, prevenção de corrosão, transferência de energia e fornecimento de uma vedação líquida nos contatos em movimento (MANNEKOTE *et al.*, 2018; ZAINAL *et al.*, 2018).

A escolha de um lubrificante adequado para uma aplicação reflete em uma prorrogação da vida útil das máquinas e seus componentes, além de aumentar sua eficiência e confiabilidade (ZAINAL *et al.*, 2018).

Segundo a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), os óleos lubrificantes são subdivididos de acordo com a sua base de formulação: óleos minerais (obtidos a partir da destilação do petróleo), óleos graxos (de origem animal ou vegetal), óleos sintéticos (produzidos em laboratórios) e óleos compostos (misturas de óleos minerais e graxos) (BRASIL, 2020).

Ainda, existem os óleos aditivados, estes são compostos por algum tipo de óleo mencionado anteriormente com a adição de aditivos. Os aditivos têm a função de reforçar,

acrescentar e/ou eliminar as ações de determinadas propriedades do óleo (ABDULBARI; AKINDOYO; MAHMOOD, 2015; BRASIL, 2020). Os principais aditivos utilizados são para proteção contra oxidação, desgaste, pressão extrema, resistência à corrosão, antiferrugem e aderência (HONARY; RICHTER, 2011; NAGENDRAMMA; KUMAR, 2015).

O desempenho de um lubrificante está ligado à sua composição química, aos aditivos incorporados e ao balanceamento da formulação. Todo lubrificante apresenta uma determinada especificação, ou seja, um conjunto de faixas de tolerância e limites de enquadramento. Contudo, estas não são garantia de um bom desempenho, pois somente a aplicação demonstra a sua performance. Os ensaios laboratoriais simulam condições de aplicação do lubrificante, sem, entretanto, garantir o bom desempenho em serviço (CARRETEIRO; BELMIRO, 2006).

2.2.3.1 Lubrificantes líquidos

O óleo lubrificante é constituído de um óleo base e produtos químicos altamente especializados para atender diversos requisitos de desempenho (KUMAR; MISHRA; MUKHERJEE, 2005). O óleo base contribui com características fundamentais específicas, enquanto os aditivos conferem características adicionais ao produto final (MANNEKOTE *et al.*, 2018).

Segundo Chan *et al.* (2018), em média, um óleo lubrificante típico consiste em 93% de óleo base e 7% de aditivos, embora o teor do último possa variar de 1%, como em óleos simples de compressor, até 30%, como em óleo de engrenagem e fluidos de corte.

Em relação aos aditivos, o grupo mais importante é o dos aditivos tribológicos, já que o objetivo final é reduzir o desgaste e os danos às máquinas. Assim, toda nova formulação busca obter melhor desempenho, maior eficiência energética e um ciclo de vida mais longo para o maquinário, bem como intervalos mais longos para a substituição do óleo (CHAN *et al.*, 2018).

Na prática, o desempenho das formulações em termos de atrito e desgaste é avaliado com base no coeficiente de atrito (razão da força de atrito entre dois corpos e a força normal que pressiona os corpos) e no diâmetro e/ou volume de desgaste após a atividade de deslizamento (CHAN *et al.*, 2018).

A análise de alterações nas propriedades físico-químicas do óleo ajuda a estimar a extensão da degradação em suas propriedades, tais como viscosidade, acidez, teor de água, grau de oxidação, entre outros, além de fornecer informações importantes sobre a condição do

óleo, bem como da máquina. Alterações indesejáveis nestas propriedades podem afetar o desempenho e levar à falha dos componentes mecânicos (KUMAR; MISHRA; MUKHERJEE, 2005).

2.2.3.1.1 Principais propriedades dos óleos lubrificantes

2.2.3.1.1.1 Viscosidade

A viscosidade pode ser interpretada como a resistência ao escoamento que os fluidos apresentam e corresponde ao conceito informal de espessura. Alta viscosidade significa que a substância possui alta resistência ao fluxo enquanto que baixa viscosidade significa baixa resistência ao escoamento (ZAINAL *et al.*, 2018).

A viscosidade desempenha um papel vital na capacidade de um lubrificante em reduzir o atrito e o desgaste. Uma viscosidade muito alta tem como consequência um aumento de temperatura e de arrasto do óleo, enquanto uma viscosidade muito baixa aumentará o atrito de contato metal-metal entre as partes móveis (ZAINAL *et al.*, 2018).

Assim, a viscosidade é considerada a propriedade mais importante dos óleos lubrificantes. Pode ser expressa em termos de viscosidade dinâmica (absoluta), cuja unidade de medida é o (Pa.s) ou (P) (Poise), ou viscosidade cinemática, geralmente expressa em ($\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) ou (cSt) (centistokes) (BHUSHAN, 2013; KHONSARI; BOOSER, 2017).

2.2.3.1.1.2 Índice de viscosidade

O índice de viscosidade (VI) é um número adimensional que indica mudança no valor da viscosidade de um fluido com a variação de temperatura. Um alto VI indica uma pequena variação na viscosidade em relação a uma mudança de temperatura e vice-versa. Lubrificantes de ótima qualidade apresentam um VI alto, indicando que podem ser utilizados em uma ampla faixa de temperaturas, mantendo a espessura do filme de óleo. Por outro lado, um baixo VI indica que a viscosidade do óleo é menos estável à altas temperaturas e, portanto, à medida que aumenta o valor da temperatura, a espessura do filme lubrificante tende a ser mais fina (ZAINAL *et al.*, 2018).

2.2.3.2 Lubrificantes pastosos

A graxa lubrificante, juntamente com o óleo lubrificante, são um dos principais tipos de lubrificantes amplamente utilizados em quase todos os tipos de máquinas modernas (MAKSIMOVA *et al.*, 2018).

A lubrificação com graxa é uma mistura complexa de ciência e engenharia, e exige uma abordagem interdisciplinar. A graxa pode ser mais do que um lubrificante, já que apresenta diversas funcionalidades como vedação, inibidor de corrosão, amortecedor e supressor de ruído (GOW, 2010).

Na literatura podem ser encontradas várias definições para o termo graxa. Carreteiro e Belmiro (2006) definem que a graxa é uma combinação entre um fluido lubrificante e um espessante, no intuito de obter um produto homogêneo semi-sólido com ótima lubricidade.

Gow (2010) afirma que a graxa é um sólido plástico viscoelástico, portanto, líquido ou sólido, dependente das condições físicas aplicadas de tensão e/ou temperatura. Por ser um sólido plástico viscoelástico, a graxa é extremamente complicada em relação às suas características físico-químicas.

Já segundo a norma americana ASTM D 4175, a graxa é um fluido sólido ou semi-sólido feito de um agente espessante em um lubrificante líquido e outros ingredientes que conferem propriedades especiais (HONARY; RICHTER, 2011; ABDULBARI; AKINDOYO; MAHMOOD, 2015; ASTM, 2019).

A grande vantagem da utilização das graxas é que pelo fato de serem semi-sólidas, elas podem oferecer os benefícios dos lubrificantes líquidos sem a necessidade de um reservatório, e também os benefícios dos lubrificantes sólidos, mantendo a estrutura do corpo (HONARY; RICHTER, 2011).

2.2.3.2.1 Composição

A graxa é composta de pelo menos dois constituintes principais: o fluido base e o sistema espessante. Normalmente, acrescentam-se aditivos para que a graxa obtenha um melhor desempenho (GANGULE; DWIVEDI, 2001; ABDULBARI; AKINDOYO; MAHMOOD, 2015; ABDULBARI; ZUHAN, 2018).

O óleo base executa a lubrificação real, enquanto o espessante confere o comportamento reológico e tribológico adequado à graxa, ou seja, fornece uma fase sólida contínua, inclui o lubrificante e fornece estrutura física aparente. Os aditivos realçam algumas

propriedades como oxidação, desgaste, lubrificação ou fricção (GANGULE; DWIVEDI, 2001; NAGENDRAMMA; KUMAR, 2015).

Gow (2010) e Honary e Richter (2011) apontam que formulação da graxa é constituída de normalmente 85% de óleo base, 10% de espessante e 5% de aditivos que conferem propriedades especiais. No entanto, Gangule e Dwivedi (2001) generalizam, e afirmam que as graxas são constituídas de 65 a 90% de lubrificante, 5 a 30% de espessante e o restante é composto pelos aditivos.

O óleo base pode ser de natureza mineral, sintética ou vegetal, sendo o primeiro amplamente utilizado. Os agentes espessantes variam de simples e complexos (sódio, lítio, cálcio, alumínio, bário e titânio) a materiais poliméricos (poliuréias, por exemplo), e inorgânicos (argilas e sílica gel) (não sabões). Já os aditivos modificam as microestruturas e melhoram as propriedades desejáveis das graxas lubrificantes (GANGULE; DWIVEDI, 2001; GOW, 2010; ABDULBARI; AKINDOYO; MAHMOOD, 2015).

2.2.3.2.2 Fabricação

O desempenho de uma graxa depende do tipo de lubrificante, espessante, aditivos e do método de fabricação empregado. Quanto ao último, existem dois processos para a fabricação das graxas: formar o sabão na presença do óleo ou dissolver o sabão, produzido separadamente, no óleo (CARRETEIRO; BELMIRO, 2006).

As graxas totalmente renováveis, ou seja, tanto o lubrificante como o espessante são derivados do óleo vegetal, podem ser formuladas de duas maneiras. A primeira, consiste na mistura do lubrificante e do espessante, produzidos separadamente, via esterificação e saponificação, respectivamente, em proporções desejadas (GANGULE; DWIVEDI, 2001; DWIVEDI; SAPRE, 2002).

Na segunda maneira, a graxa pode ser formada através do mesmo óleo por processos simultâneos de alcoólise e saponificação. Neste caso, um alcalino é utilizado tanto como catalizador para a reação de alcoólise, quanto para reagir com o óleo para formar o sabão via saponificação (GANGULE; DWIVEDI, 2001; DWIVEDI; SAPRE, 2002).

Segundo Honary e Richter (2011), as graxas podem ser classificadas basicamente em três tipos: graxas simples (à base de sabão), graxas complexas (sabão-sal) e graxas sem sabão.

As graxas simples são feitas a partir do processo de reação do óleo básico e do ácido graxo com o hidróxido de metal desejado para formar sabão. As graxas complexas são

processadas da mesma maneira que as graxas simples, exceto que incorporam um sal como agente complexante.

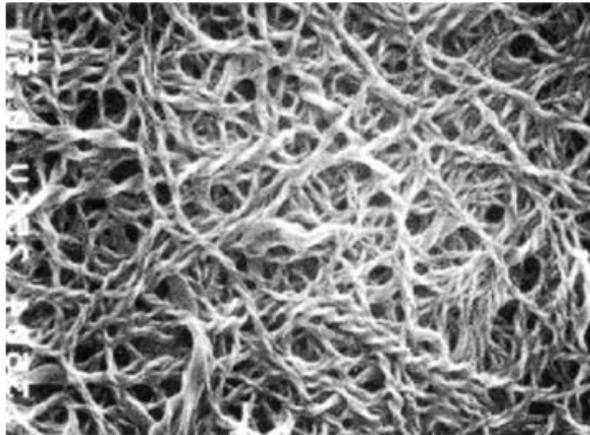
Já as graxas sem sabão foram desenvolvidas para superar algumas das limitações das graxas simples e complexas. As graxas à base de sabão possuem limitações quando expostas a temperaturas extremamente baixas ou quentes, e isso as tornam vulneráveis ao endurecimento a temperaturas extremamente baixas ou à liquefação a temperaturas extremamente altas.

2.2.3.2.3 Estrutura

Uma ilustração popular remete que a graxa assemelhasse com a relação água (fluido lubrificante) em uma esponja (espessante) (GOW, 2010). O corpo da graxa é formado pelo espessante, que forma uma matriz estrutural semelhante à uma esponja, permitindo que os vazios nesta matriz sejam preenchidos com o óleo lubrificante (HONARY; RICHTER, 2011).

A Fig. 16, retirada com o auxílio do microscópio eletrônico de varredura (MEV), destaca a estrutura fibrosa de um espessante utilizado na fabricação de graxa.

Figura 16 – Estrutura fibrosa de um espessante



Fonte: Honary e Richter (2011).

A importância do sabão é que ele oferece a capacidade de vedar e impedir que o óleo vaze ou que contaminantes entrem. Sua matriz atua como um reservatório para o óleo, fornecendo os lubrificantes e os aditivos de desempenho no ponto de contato (CARRETEIRO; BELMIRO, 2006; HONARY; RICHTER, 2011).

2.2.3.2.4 Principais propriedades das graxas lubrificantes

2.2.3.2.4.1 Número de consistência NLGI (*NLGI consistency number*)

É importante observar que a graxa não possui viscosidade. Esta propriedade é definida para fluidos que seguem as leis de Newton para escoamentos, enquanto a graxa, por ser uma substância fibrosa, possui um comportamento diferente dependendo da posição das fibras na hora do escoamento (CARRETEIRO; BELMIRO, 2006).

Gow (2010) utiliza uma expressão muito interessante: “*Grease is not a thick oil but a thickened oil*”. A tradução para essa expressão seria: A graxa não é um óleo grosso, mas um óleo espessado.

Isso se dá pelo fato de que a matriz da graxa é mantida unida por forças de ligação internas que lhe dão um caráter sólido ao resistir à uma deformação. Essa rigidez é referenciada como consistência. Quando as tensões externas excedem o nível limiar de tensão (tensão de cisalhamento), o sólido passa por um estado transitório de tensão plástica antes de se transformar em um líquido que flui (CARRETEIRO; BELMIRO, 2006; GOW, 2010).

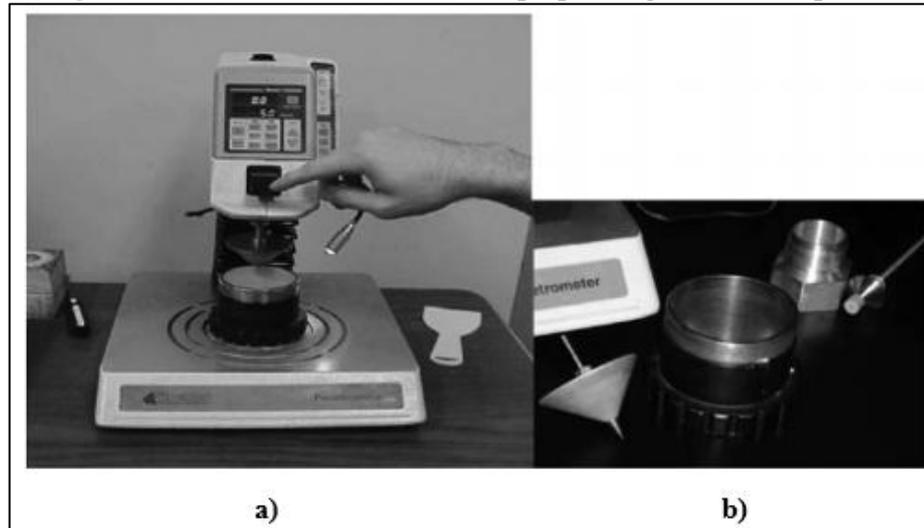
A consistência pode ser vista como a propriedade mais importante de uma graxa lubrificante, a diferença vital entre ela e óleo lubrificante. Sob a força da gravidade, a graxa está normalmente sujeita a tensões abaixo da tensão de cisalhamento e, portanto, permanecerá no local como um corpo sólido. No entanto, em níveis mais altos de tensão de cisalhamento a graxa fluirá (GOW, 2010).

A consistência de uma graxa é definida através de um método padrão da norma americana ASTM D 217, e assim, as graxas são classificadas de acordo com o chamado sistema NLGI, estabelecido pela *National Lubricating Grease Institute* (GOW, 2010; HONARY; RICHTER, 2011).

Através de um dispositivo chamado penetrômetro, um objeto padrão em forma de cone é lançado em condições controladas em uma amostra de graxa. A profundidade de penetração é medida em milímetros e refere-se ao número de consistência (GOW, 2010; HONARY; RICHTER, 2011).

A Fig. 17 a seguir representa o equipamento e os seus componentes utilizados na medição do número de consistência de uma graxa.

Figura 17 – a) Penetrômetro e b) Copo para a graxa e cone padrão



Fonte: Honary e Richter (2011).

Assim, as graxas são identificadas por um sistema de numeração, com números mais baixos significando graxas menos espessas e números mais altos significando graxas mais espessas. Esta classificação é universal e a grande maioria das graxas são utilizadas e escolhidas apenas com base neste sistema (GOW, 2010).

Os números resultantes são referidos como graus NLGI, conforme mostrado na Tab. 1. Uma graxa com grau NLGI 0, por exemplo, é uma graxa menos espessa que a de grau NLGI 2. Para que uma graxa atenda a um número de classe, o valor da penetração precisará estar dentro da faixa especificada (HONARY; RICHTER, 2011).

Tabela 1 – Números de consistências NLGI

Grau NLGI	Penetração trabalhada (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: Honary e Richter (2011).

2.2.3.2.4.2 Ponto de gota

Outra propriedade importante das graxas lubrificantes é o seu ponto de gota. Este indica a temperatura em que se inicia a mudança do estado pastoso para o estado líquido (primeira gota), assim através dele uma determinada graxa limita a sua aplicação. Na prática, usa-se limitar a temperatura máxima de trabalho em 20 a 30°C abaixo de seu ponto de gota (CARRETEIRO; BELMIRO, 2006).

2.2.4 Análise de lubrificantes

A metodologia utilizada na análise de lubrificantes consiste na medida da taxa de contaminação e de sua análise. A ideia envolvida é que, ao longo do funcionamento, as peças lubrificadas contaminam o lubrificante com os materiais provenientes de seu desgaste. Verificando-se a taxa de contaminação por partículas sólidas, o material e sua dimensão, é possível identificar a presença de um mau funcionamento e sua origem (ARATO JÚNIOR, 2004).

Considerando que o lubrificante é o vetor das partículas de desgaste geradas por uma máquina, o estudo da evolução da concentração de partículas em suspensão, da natureza de sua constituição, de suas dimensões e de sua morfologia é um procedimento eficaz para identificar e afastar alguma anomalia.

Segundo Arato Júnior (2004), a análise da natureza da partícula serve para identificar sua origem, e é fundamental para definir qual componente da máquina está sendo monitorado.

O estudo das dimensões das diferentes partículas serve para identificação dos diferentes níveis de desgaste. Uma classificação relativa do nível de desgaste como função distribuição das dimensões das partículas pode ser:

- **Desgaste normal:** a distribuição granulométrica está mais entre 0,1 e 1,0 μm . As partículas maiores não ultrapassam 10 μm ;
- **Desgaste acentuado:** neste caso, o intervalo de maior concentração das partículas é de 0,1 a 10 μm . As partículas maiores atingem 100 μm ;
- **Desgaste avançado:** começa a aumentar a concentração de partículas na faixa de 100 μm ;
- **Desgaste catastrófico:** a maior concentração de tamanhos de partículas está entre 100 e 1000 μm . É defeito por atrito.

Já a morfologia da partícula ajuda na identificação do modo de desgaste. A Tab. 2 é uma orientação qualitativa desse tipo de estudo.

Tabela 2 – Morfologia das partículas e modo de desgaste

Forma das Partículas	Tipo de desgaste	Importância do desgaste
Pequenas plaquetas (0,3 a 5 μm)	Adesão	Desgaste anormal
Grandes plaquetas (5 a 150 μm)	Atrito	Desgaste perigoso
Escamas (10 μm a 1 mm)	Escamação	Desgaste perigoso
Lascas enroladas ou encurvadas	Abrasão	Grave, sobretudo se as lascas forem numerosas
Esferas plásticas	Depósito de aditivos	Ocorrência grave
Esferas metálicas pequenas (1 a 5 μm)	Fadiga dos rolamentos	Ocorrência grave
Esferas metálicas grandes (> 10 μm)	Cavitação – erosão	Ocorrência grave
Magmas, aglomerados (2 a 150 μm)	Corrosão - oxidação	Ocorrência grave

Fonte: Adaptado de Arato Júnior (2004).

Desta forma pode-se dizer que a análise de lubrificantes permite identificar os primeiros desgastes de um componente. A identificação é feita a partir do estudo das partículas sólidas que ficam dispersas nestes fluidos.

2.2.5 Preparação da amostra

Um fator fundamental para qualquer programa de análise de lubrificantes é adquirir uma amostra de qualidade. Uma amostra ruim proporcionará interpretações errôneas com relação ao monitoramento da condição ou diagnóstico de falhas de um equipamento (TOMS, 1995).

Assim, a amostragem deve ser realizada de modo que a amostra represente as condições reais do lubrificante no sistema. Diversos fatores devem ser levados em consideração ao realizar uma amostragem: o tipo e a condição de operação do maquinário, utilização de equipamentos limpos para evitar a introdução de contaminantes e, identificar a melhor posição para a coleta da amostra, pois em casos de sistemas não-circulantes, determinados pontos podem conter uma concentração de partículas depositadas (TOMS, 1995; ROYLANCE; HUNT, 1999).

Além disso, Toms (1995) afirma que é necessário estabelecer um intervalo ideal entre as amostragens. Normalmente, a frequência destas varia de duas a quatro vezes a frequência de falha do equipamento.

A eficácia de um programa de monitoramento da condição de um lubrificante baseia-se na determinação da quantidade e investigação dos particulados ferrosos presentes em uma amostra. Assim, diversos instrumentos foram desenvolvidos e utilizam alguma forma de sensoriamento magnético ou filtragem para medir e analisar a concentração das partículas de desgaste (TOMS, 1995).

Exemplos destes instrumentos e que serão, posteriormente, discutidos são: o monitor automático de partículas (PQA – *Particle Quantifier Analysis*), o depositador rotativo de partículas (RPD – *Rotary Particle Depositor*) e o Ferrocópio (Microscópio óptico bicromático).

2.2.6 Técnicas de análise de lubrificantes

A seguir, serão descritos alguns dos principais métodos utilizados na análise de partículas de desgaste, dentre os quais são: a ferrografia, a filtragem por membrana, a microscopia óptica e a espectroscopia.

2.2.6.1 Ferrografia

A ferrografia é classificada como uma técnica de manutenção preditiva e consiste na determinação da severidade e tipo de desgaste, assim como a fonte do mesmo, por meio da identificação da morfologia, acabamento superficial, coloração, natureza e tamanho das partículas encontradas em amostras de óleos ou graxas lubrificantes (LAGO, 2007; KIMURA, 2010).

Este método foi introduzido na década de 1970 por Vernon C. Westcott, um tribologista de Massachusetts, Estados Unidos. O objetivo era obter uma melhor análise dos óleos lubrificantes dos motores aeronavais (KIMURA, 2010).

As técnicas ferrográficas podem ser classificadas em dois níveis de análise: uma quantitativa e uma analítica. A primeira busca avaliar as condições de desgaste de uma máquina ou equipamento por meio da quantificação da concentração das partículas em suspensão no lubrificante, enquanto que a segunda consiste na observação da morfologia dessas partículas. Ambas as técnicas serão discutidas com detalhes a seguir.

2.2.6.2 Ferrografia quantitativa

A ferrografia quantitativa, também conhecida como ferrografia de leitura direta (*Direct Reading – DR*), consiste na quantificação do tamanho e número de partículas ferrosas presentes em um lubrificante. Através desta técnica pode-se obter informações sobre o grau de severidade do desgaste presente no sistema mecânico, além de serem úteis para a construção de gráficos de tendências (KIMURA, 2010).

Este método proporciona de maneira rápida e prática uma classificação das partículas segundo o seu tamanho, sendo L_P (*large particles*) para partículas grandes, maiores que 5 μm , e S_P (*small particles*) para partículas pequenas, menores que 5 μm .

O valor da concentração total de partículas de desgaste (WPC), e a porcentagem de partículas grandes (PLP), podem ser obtidos através das Eq. (9) e (10), respectivamente.

$$WPC = L_P + S_P \quad (9)$$

Sendo WPC a concentração total de partículas, L o número de partículas grandes e S o número de partículas pequenas.

$$PLP = \left[\frac{(L_P - S_P)}{(L_P + S_P)} \right] * 100 \quad (10)$$

Onde PLP representa a porcentagem de partículas grandes.

Um instrumento muito utilizado pela técnica de leitura direta é o monitor automático de partículas. O PQA determina a quantidade relativa de partículas magnéticas pelo grau de distorção de um campo de fluxo magnético (TOMS, 1995). Em outras palavras, este instrumento examina a amostra de um lubrificante por meio de um campo indutivo, que ao detectar a presença de materiais ferromagnéticos apresenta o resultado na forma de um índice adimensional chamado de índice PQ (*PQ index*). (KIMURA, 2010).

A Fig. 18 a seguir ilustra um monitor automático de partículas (PQA).

Figura 18 – Monitor automático de partículas (PQA)



Fonte: Machinery Lubrication (2020).

Embora a técnica de contagem de partículas não possa ser utilizada para diagnosticar um mecanismo de desgaste, as informações obtidas permitem a construção de gráficos para análises de tendências, possibilitando identificar e intervir sobre uma máquina ou equipamento quando há condições de maior severidade.

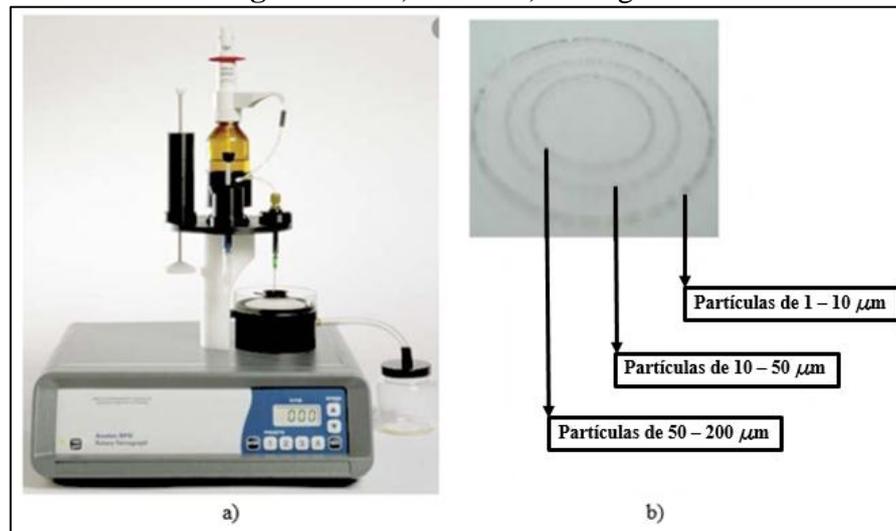
2.2.6.3 Ferrografia analítica

Diferente da ferrografia direta que indica uma tendência anormal de desgaste, as técnicas ferrográficas analíticas permitem um estudo profundo das partículas cujo tamanho esteja entre 1 e 250 μm , fornecendo informações relevantes sobre a condição real da máquina ou equipamento de onde a amostra de lubrificante foi retirada (TOMS, 1995; ARATO JÚNIOR, 2004).

Para tal finalidade, um ferrograma deve ser construído, normalmente, através de um RPD. Este instrumento é muito eficiente, pois extrai as partículas presentes na amostra através da ação de forças magnéticas, centrífugas e gravitacionais. Normalmente, as partículas são depositadas sobre uma lâmina de polímero de borossilicato formando três anéis concêntricos. Durante a deposição ocorre a separação das partículas em relação ao seu tamanho, na qual partículas maiores ficam retidas no anel interno, partículas médias no anel intermediário e partículas pequenas no anel externo (KIMURA, 2010).

A Fig. 19 a seguir demonstra um depositador rotativo de partículas (RPD) e a lâmina de um ferrograma.

Figura 19 – a) RPD e b) Ferrograma



Fonte: Adaptado de Kimura (2010).

Assim, o ferrograma pode ser analisado com o auxílio de técnicas microscópicas, o que possibilita a identificação da morfologia das partículas e o tipo de desgaste, e consequentemente a possível anomalia.

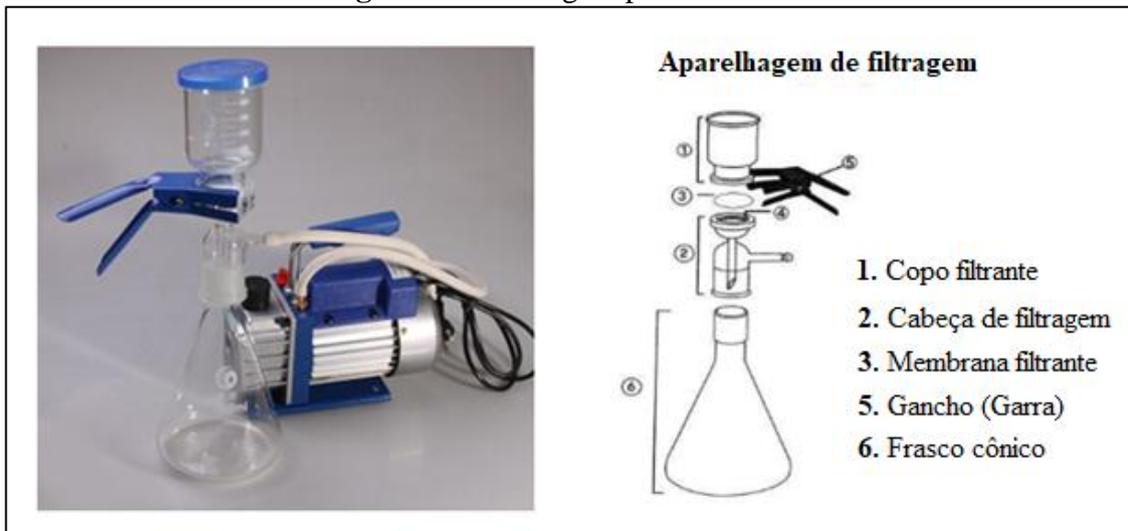
A utilização de microscópios ópticos bicromáticos permite distinguir as partículas ferrosas de outras partículas sólidas, e isso representa uma grande vantagem comparada a outras técnicas (TOMS, 1995).

No entanto, as principais desvantagens da utilização da ferrografia analítica são: as partículas não magnéticas, de modo geral, não ficam retidas no ferrograma e, exige-se um alto nível de experiência por parte do analista, além de necessitar de muito tempo para a preparação e análise das amostras (TOMS, 1995).

2.2.6.4 Filtragem por membrana

A técnica de filtragem por membrana baseia-se na passagem da amostra de lubrificante, misturada a um solvente (geralmente é utilizado o pentano ou hexano), por um elemento filtrante de alta precisão, geralmente com porosidade de 5 μm . As partículas retidas terão então um tamanho maior ou igual ao tamanho da malha do filtro. Com isso, a membrana é observada no microscópio óptico. Afim de acelerar o processo de filtragem, pode ser utilizada uma bomba a vácuo.

A Fig. 20 a seguir representa um esquema de filtragem por membrana.

Figura 20 – Filtragem por membrana

Fonte: Alquilabor (2020).

A grande desvantagem desta técnica está na não separação das partículas por tamanho, o que dificulta o processo de análise. No entanto, esta técnica permite reter tanto as partículas ferromagnéticas como as não ferrosas, além de ser um método prático, rápido e barato (TOMS, 1995; ROYLANCE, HUNT, 1999).

2.2.6.5 Microscopia

Algumas técnicas microscópicas têm sido utilizadas para a análise de partículas de desgaste, entre elas destaca-se a Microscopia Óptica - MO (OM – *Optical Microscopy*) e a Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV (SEM – *Scanning Electron Microscopy*).

A Microscopia óptica é uma técnica simples e por utilizar princípios físicos de ampliação através de lentes ópticas, além de apresentarem uma fonte de luz bicromática, é possível obter informações de contorno e coloração das partículas presentes no ferrograma ou membrana. Apesar do funcionamento da MO ser simples, é necessário que o analista tenha conhecimentos nas áreas metalúrgica e manutenção para obter informações relevantes dos mecanismos de desgastes, possíveis fontes do desgaste e grau de deterioração presentes no sistema (TOMS, 1995). A maioria dos microscópios ópticos possuem câmera que permite que as imagens sejam salvas para análises em *softwares*.

A Fig. 21 a seguir demonstra um microscópio óptico bicromático (ferroscópio)

Figura 21 – Ferrosκόpio



Fonte: Spach Optics (2020).

Já a microscopia eletrônica de varredura (MEV) é uma técnica de imagem de superfície onde feixe de elétrons são utilizados para escanear a superfície de uma amostra. Esta técnica permite obter imagens de alta resoluções com ampliações de até 200.000 vezes. Além disso, informações de composição (análise de elementos) também podem ser obtidas monitorando raios X secundários gerados pelas interações feixe de elétrons-espécime (Detector EDS). As imagens obtidas são transferidas para um computador para análise visual e numérica da morfologia das partículas (TOMS, 1995).

No entanto, a técnica MEV apresenta algumas limitações, entre elas pode-se citar que como a imagem é gerada eletronicamente, não é possível visualizar e diferenciar as partículas através de sua coloração. Além disso, a amostra a ser analisada deve sofrer um pré-tratamento, através de um metalizador, e isso acaba tornando o MEV um processo demorado e de alto custo (TOMS, 1995).

2.2.6.6 Métodos espectroquímicos

Medidas baseadas na luz ou outras formas de radiação eletromagnética são amplamente empregadas em química analítica. A espectroscopia é a ciência que apresenta como objeto de estudo as interações da radiação com a matéria (SKOOG *et al.*, 2006, 2014).

Skoog *et al.* (2006, 2014) afirma que os métodos espectroscópicos de análise são baseados na medida da quantidade de radiação produzida ou absorvida pelas moléculas ou pelas espécies atômicas de interesse. Ainda segundo o autor, as regiões espectrais que tem

sido mais empregadas incluem os raios γ (gama), os raios X, ultravioleta (UV), visível, infravermelho (IV), microondas e radiofrequência (RF).

Em uma medida espectroscópica, a amostra é estimulada aplicando-se energia. Esta pode ser na forma de calor, energia elétrica, luz, partículas ou por uma reação química. Antes do estímulo, o analito (substância ou componente químico) encontra-se em seu estado fundamental (estado de energia mais baixo). Aplicando-se o estímulo, as moléculas ou os átomos do material ionizam-se, ou seja, sofrem uma transição para um estado de maior energia ou estado excitado (ROYLANCE; HUNT, 1999; SKOOG *et al.*, 2006, 2014).

Ao medir a radiação eletromagnética emitida quando as moléculas ou átomos retornam ao seu estado fundamental ou a quantidade da radiação absorvida durante a excitação, é possível obter informações relevantes sobre o analito. Os resultados dessas medidas são expressos por meio do espectro, que se refere a um gráfico da radiação emitida em função da frequência ou do comprimento de onda (ROYLANCE; HUNT, 1999; SKOOG *et al.*, 2006, 2014).

Toms (1995) aponta que os métodos espectroscópicos são muito eficazes, e por isso são comumente utilizados, quando necessário investigar uma amostra de algum lubrificante. Ao determinar os elementos químicos contidos nas partículas de desgaste, é possível localizar os componentes de máquina que sofreram algum mecanismo de desgaste.

Assim, uma das principais técnicas espectroscópicas utilizadas é a fluorescência. Esta é um processo de fotoluminescência no qual os átomos ou moléculas são excitados por absorção de radiação eletromagnética. As espécies excitadas, ao buscarem a estabilidade, retornam para o seu estado fundamental, liberando seu excesso de energia na forma de fótons de comprimento de onda característico. Com isso, é possível identificar, bem como estabelecer a proporção de cada elemento químico em uma amostra (TOMS, 1995; ROYLANCE; HUNT, 1999; SKOOG *et al.*, 2006, 2014).

2.2.7 Tipos de partículas de desgaste

As partículas de desgaste possuem características distintas que correlacionam com as condições que foram formadas. Formato, tamanho, cor, textura e tipo de material (ferroso ou não ferroso) são as características exibidas por estas partículas (LAGO, 2007).

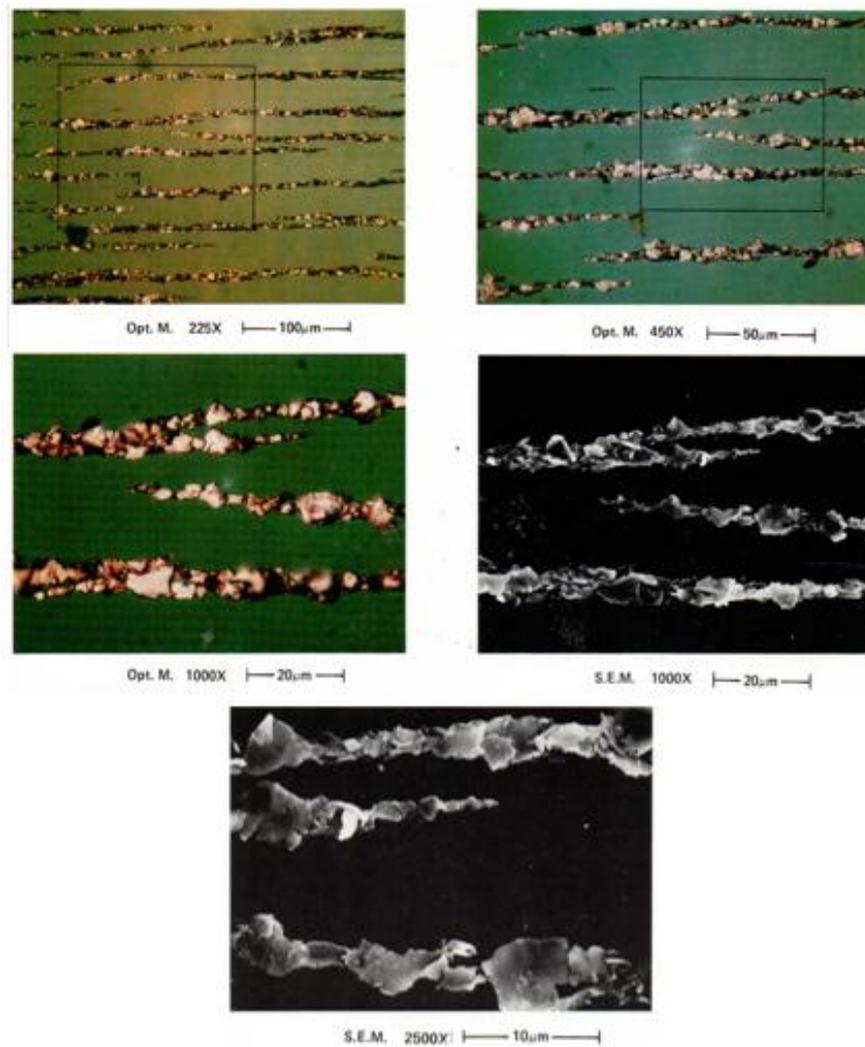
O conhecimento da morfologia e o tipo de desgaste responsável pela sua formação é de extrema importância para uma análise consistente da amostra. A seguir, serão discutidos os diferentes tipos de partículas de desgaste.

2.2.7.1 Partículas de desgaste por atrito (rubbing wear/normal wear)

Também conhecido como desgaste normal por atrito, as partículas deste desgaste são formadas pelo deslizamento normal entre duas superfícies metálicas. Estas partículas são identificadas pelo seu formato de plaquetas planas e lisas. O tamanho da partícula é geralmente pequeno, sua dimensão principal está na faixa de 0.5 a 15 μm e sua espessura varia de 0.15 a 1 μm . Este desgaste tem natureza benigna e está fortemente presente no amaciamento de superfícies deslizantes. (BOWEN; WESTCOTT, 1982).

As imagens da Fig. 22 a seguir apresentam partículas de desgaste normal. Destaca-se que as fotos foram tiradas na mesma posição, porém com ampliações diferentes.

Figura 22 – Partículas de desgaste normal por atrito observadas na análise ferrográfica de amostras de óleo



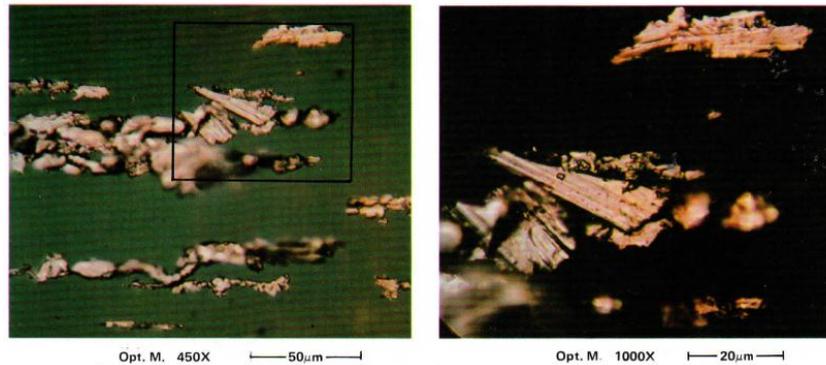
Fonte: Bowen e Westcott (1982).

2.2.7.2 Partículas de desgaste severo por deslizamento (*severe sliding wear*)

As partículas de desgaste devido ao deslizamento severo podem ser formadas sob condições de carregamento excessivo na superfície, alta velocidade de funcionamento ou por lubrificação imprópria. Estas partículas são normalmente bastante finas, enquanto que seu tamanho na dimensão principal é maior se comparado com as partículas de desgaste normal por atrito, alcançando aproximadamente 20 µm. Normalmente são identificadas por estrias paralelas em sua superfície resultantes do deslizamento (BOWEN; WESTCOTT, 1982).

A Fig. 23 a seguir apresenta partículas de desgaste severo típicas, enquanto que a Fig. 24 representa este tipo de partícula causada por aquecimento da superfície metálica devido à alta velocidade de deslizamento. Isto é notado pela mudança da coloração.

Figura 23 – Partículas de desgaste severo. Fotos tiradas na mesma posição com ampliações diferentes



Fonte: Bowen e Westcott (1982).

Figura 24 – Partícula de desgaste severo. Destaque para mudança de coloração



Fonte: Bowen e Westcott (1982).

O deslizamento severo de componentes do aço frequentemente produz partículas de coloração azul, marrom ou palha. As cores são resultado do aquecimento localizado, produzindo as cores do revenido associado ao aço. A severidade do desgaste e consequentemente a temperatura atingida são indicadas pela cor das partículas, as quais mudam da cor palha para marrom, e depois para o azul, com o aumento da temperatura (KIMURA, 2010).

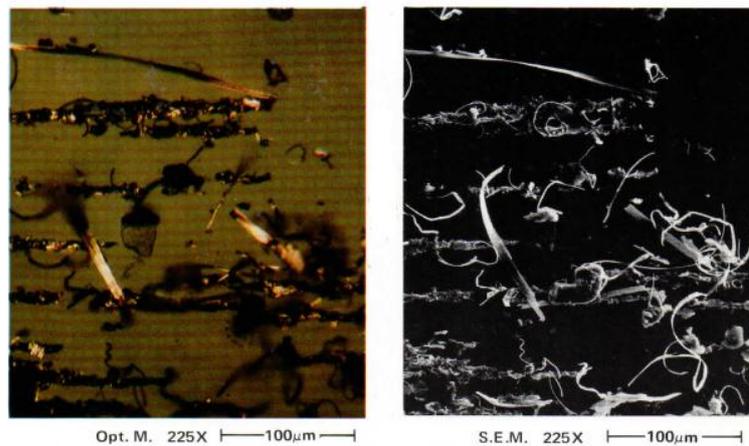
2.2.7.3 Partículas de desgaste por corte (*cutting wear*)

As partículas de desgaste devido ao corte são produzidas por penetração, ranhura ou corte de uma superfície por outra. Isto é provocado pela diferença intrínseca no nível de dureza entre as superfícies em contato, ou por contaminantes duros embutidos na superfície de menor dureza, que causam penetração na superfície oposta (GAHR, 1987; BHUSHAN, 2013).

Essas partículas são identificadas por sua grande semelhança com cavacos ou detritos de usinagem. Variam amplamente no comprimento, ou seja, de aproximadamente 5 μm para maior que 100 μm , com larguras médias de 2 a 15 μm . Frequentemente exibem cores do revenido resultante do aquecimento durante sua formação (BOWEN; WESTCOTT, 1982).

A Fig. 25 apresenta partículas de desgaste por corte.

Figura 25 – Partículas de desgaste por corte observadas na análise ferrográfica de amostras de óleo



Fonte: Bowen e Westcott (1982).

A presença de partículas de desgaste devido ao corte é indicativo de uma situação anormal de funcionamento, e requer um monitoramento cuidadoso (KIMURA, 2010).

2.2.7.4 Partículas de desgaste por fadiga (fatigue wear)

Partículas devido a fadiga são normalmente produzidas em engrenagens e em contatos de mancais de rolamentos.

2.2.7.4.1 Partículas de fadiga por rolamento (Rolling Fatigue)

Existem três tipos distintos de partículas devido a fadiga de rolamento, isto é, partículas esféricas, partículas em formas de pequenos cavacos e partículas laminares.

As partículas esféricas são produzidas no interior da trinca do mancal. Estas partículas normalmente alcançam o tamanho de aproximadamente 1 a 10 μm e sua presença é indicativo de uma provável falha (LAGO, 2007).

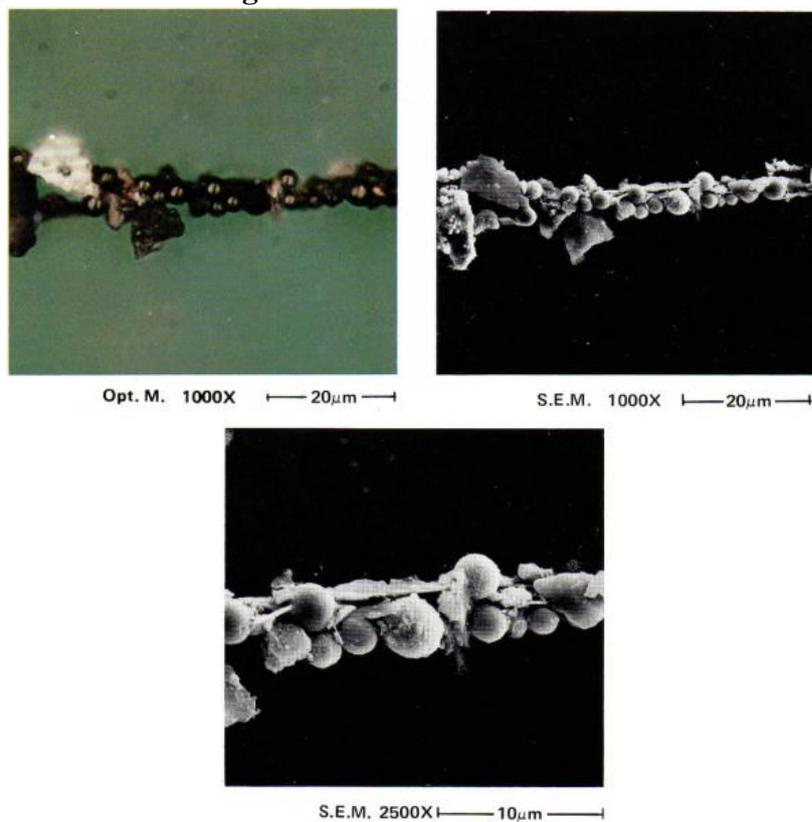
Partículas esféricas podem surgir de diferentes fontes além da fadiga do contato rolante. Elas são produzidas através dos seguintes processos: cavitação erosiva, soldagem e

retificação. As partículas produzidas por estes processos possuem geralmente um tamanho muito maior, deste modo pode-se distingui-las das produzidas pela fadiga do contato rolante (BOWEN; WESTCOTT, 1982).

Bowen e Westcott (1982) ainda ressaltam que óleos novos normalmente contêm algumas partículas esféricas que são resultantes do processo industrial.

A Fig. 26 apresenta partículas esféricas provenientes da fadiga por rolamento. Destaca-se que as fotos apresentam um aumento na magnitude das partículas.

Figura 26 – Partículas esféricas

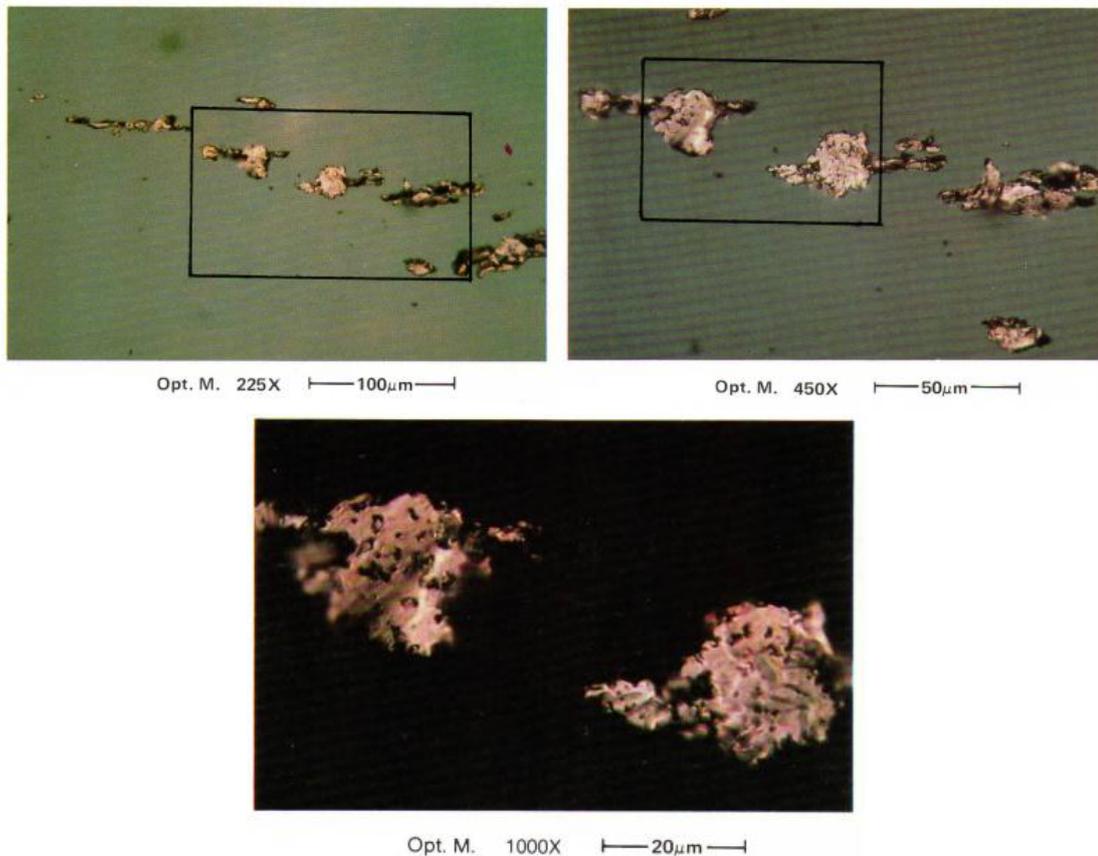


Fonte: Bowen e Westcott (1982).

As partículas de fadiga em forma de lascas são formadas pelo material removido da superfície do contato rolante, quando acontece uma cova ou lasca na superfície. Estas partículas podem atingir um tamanho de até 100 µm, com um aumento adicional no tamanho que frequentemente acontece quando procede a falha da superfície (BOWEN; WESTCOTT, 1982).

A Fig. 27 a seguir apresenta partículas de fadiga em formas de lascas. As fotos foram tiradas na mesma posição, porém com diferentes ampliações.

Figura 27 – Partículas de fadiga em formas de lascas



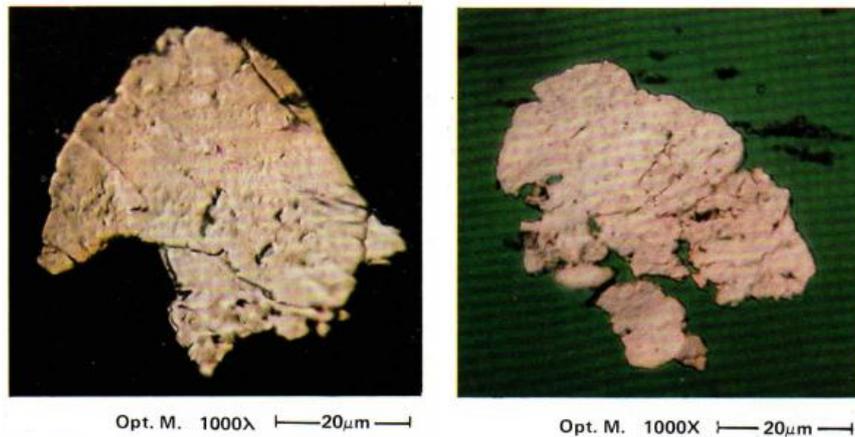
Fonte: Bowen e Westcott (1982).

Já as partículas laminares são encontradas por serem produto da passagem de uma partícula de desgaste através de uma cavidade do contato rolante. Este mecanismo produzirá partículas muito finas e relativamente grandes (principal dimensão entre 20 e 50 μm , com uma relação de 30:1 entre a dimensão principal e a espessura (BOWEN; WESTCOTT, 1982).

Uma característica exibida por estas partículas é a presença de cavidades, arredondadas ou alongadas, as quais permitem a passagem de luz transmitida quando vista por meio de um microscópio (BOWEN; WESTCOTT, 1982).

Um aumento na quantidade de partículas laminares e esféricas indica uma situação de desgaste adversa, e que há a possibilidade de falha.

A Fig. 28 a seguir apresenta partículas laminares.

Figura 28 – Partículas laminares

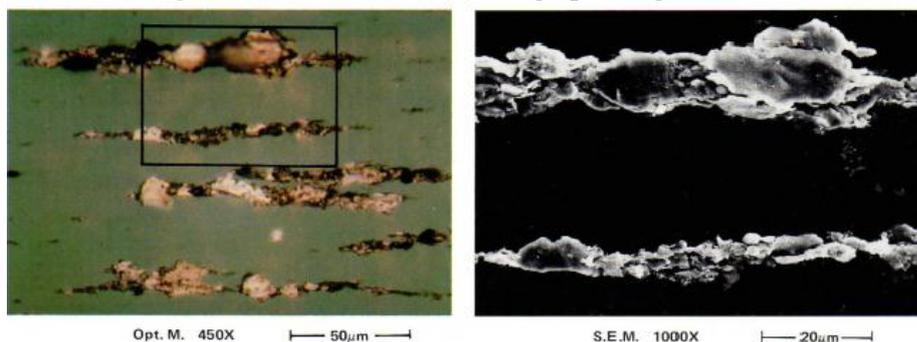
Fonte: Bowen e Westcott (1982).

2.2.7.4.2 Partículas de fadiga por engrenamento (*gear systems fatigue*)

Sistemas de engrenamento apresentam uma combinação de rolamento e escorregamento e as partículas devido a fadiga originam-se nos pontos de contato dos dentes da engrenagem (CUNHA, 2005).

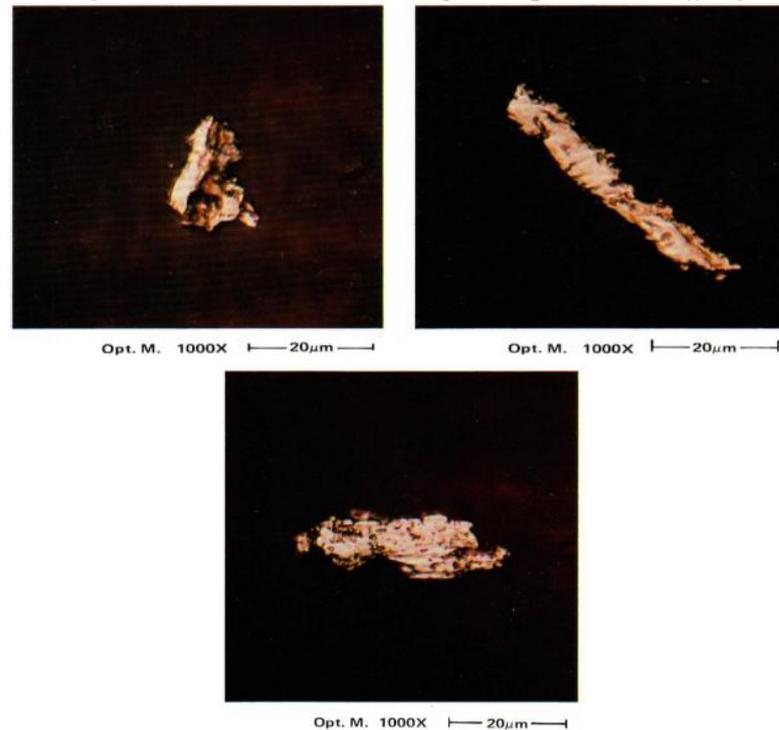
Em sua formação inicial, as partículas têm superfície lisa, extremidades irregulares e uma dimensão principal com proporção de 4:1 até 10:1 em relação à espessura (BOWEN; WESTCOTT, 1982).

As Fig. 29 e 30 apresentam partículas de fadiga por engrenamento.

Figura 29 – Partículas de fadiga por engrenamento

Fonte: Bowen e Westcott (1982).

Figura 30 – Partículas de desgaste típicas de *Scuffing*



Fonte: Bowen e Westcott (1982).

2.2.7.5 Partículas metálicas não ferrosas (*nonferrous metals*)

Além das partículas ferrosas que são depositadas por ação de uma força magnética, partículas não metálicas também se depositarão no ferrograma. O depósito destas partículas acontece de forma aleatória, geralmente localizadas no anel externo, por que são menos magneticamente atraídas quando comparadas com os materiais ferrosos (BOWEN; WESTCOTT, 1982).

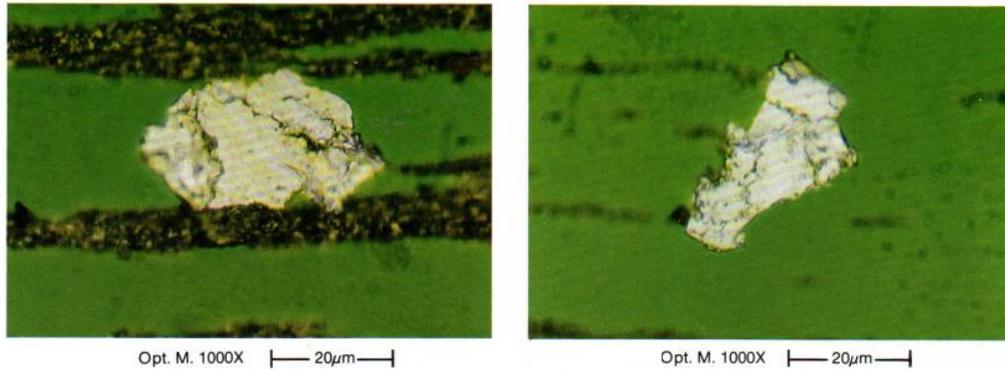
As principais partículas não ferrosas são apresentadas a seguir:

2.2.7.5.1 Partículas de alumínio (*aluminum particles*)

Em relação as partículas metálicas não ferrosas, as partículas de alumínio são as que aparecem com mais frequência nos ferrogramas (BOWEN; WESTCOTT, 1982).

Estas partículas apresentam uma cor prateada-cinza quando vistas por luz refletida, e normalmente apresentam uma superfície com topografia irregular (aparência rugosa). O tamanho destas partículas varia entre 25 e 500 μm (LAGO, 2007).

A Fig. 31 a seguir destaca partículas de alumínio.

Figura 31 – Partículas de alumínio

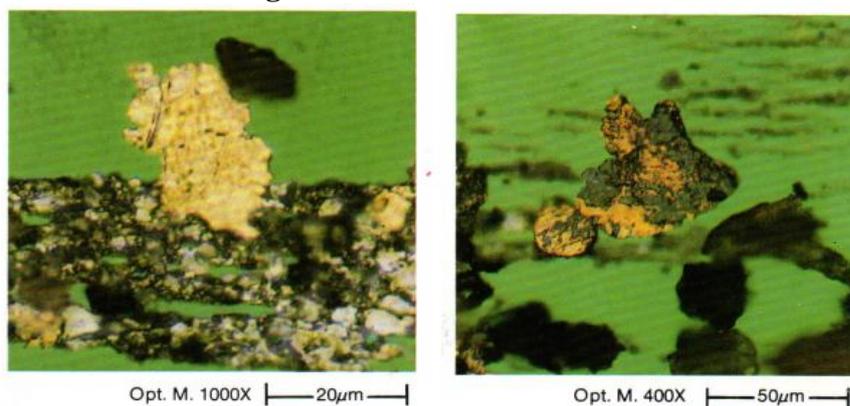
Fonte: Bowen e Westcott (1982).

2.2.7.5.2 Partículas de liga de cobre (copper alloy)

As partículas de liga de cobre são facilmente reconhecidas pela sua cor amarelo-avermelhada. Nenhum outro metal apresenta tal coloração, com exceção do ouro, porém este é raramente utilizado (BOWEN; WESTCOTT, 1982).

O tamanho destas partículas pode variar entre 2 e 100 μm e seu formato dependerá do mecanismo de desgaste. Ocasionalmente serão encontradas partículas de cobre soldadas com partículas metálicas, devido ao mecanismo de uso intrínseco que causa adesão entre os dois materiais (KIMURA, 2010).

A Fig. 32 destaca partículas de cobre.

Figura 32 – Partículas de cobre

Fonte: Bowen e Westcott (1982).

2.2.7.5.3 Partículas de liga de chumbo/estanho (lead/tin alloy)

As partículas de liga de chumbo e estanho (Pb/Sn) não são encontradas com frequência nos ferrogramas, pelo fato de apresentarem características muito dúcteis. Quando

vistas, estas partículas normalmente estão oxidadas, já que são facilmente suscetíveis à oxidação (BOWEN; WESTCOTT, 1982).

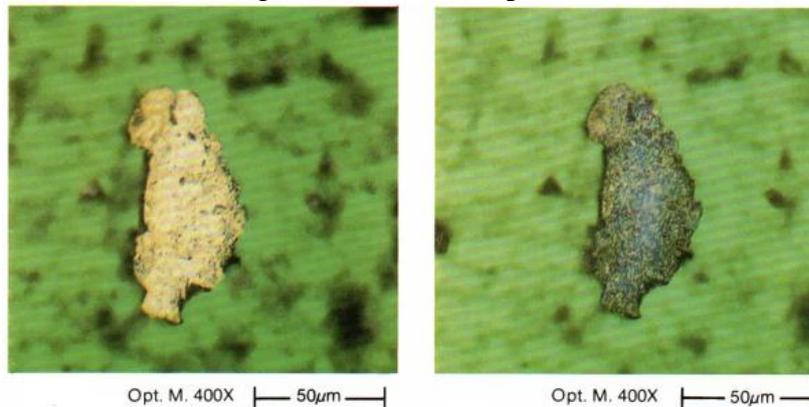
As Fig. 33 e 34 apresentam partículas de liga de chumbo e estanho. Destaca-se na Fig. 34 a mesma partícula, porém antes e depois de sofrer tratamento por calor.

Figura 33 – Partículas de liga *Pb/Sn*.



Fonte: Bowen e Westcott (1982).

Figura 34 – Partículas de liga *Pb/Sn* antes e depois de sofrer tratamento térmico

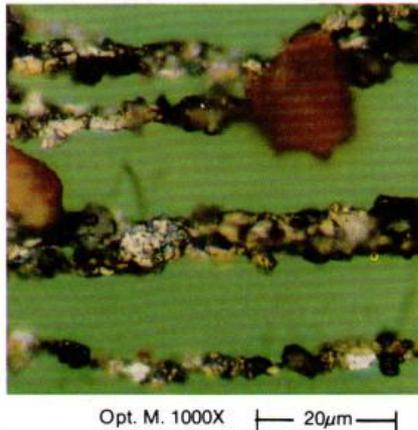


Fonte: Bowen e Westcott (1982).

2.2.7.6 Óxidos ferrosos (*ferrous oxides*)

De acordo com Bowen e Westcott (1982), óxidos ferrosos são divididos em dois grupos: óxidos vermelhos (*red oxides*) e óxidos pretos (*black oxides*), cujas fórmulas químicas são FeO , Fe_2O_3 e Fe_3O_4 . O óxido vermelho é produto da reação final entre o ferro e oxigênio à temperatura ambiente, e sua presença indica que existe umidade no sistema de lubrificação. Já a presença de óxido preto indica inadequada lubrificação, além de calor excessivo durante a geração de partículas. A Fig. 35 a seguir apresenta partículas de óxidos de ferro.

Figura 35 – Partículas de óxidos ferrosos



Fonte: Bowen e Westcott (1982).

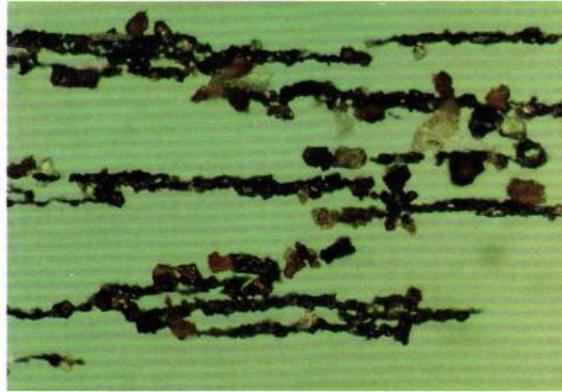
A seguir serão apresentados os dois grupos de óxidos de ferro.

2.2.7.6.1 *Partículas de óxido vermelho (red oxides)*

As partículas de óxido de ferro vermelho podem ser formadas por desgaste no deslizamento entre superfícies metálicas. Devido à presença de água (umidade) no sistema de lubrificação, esses óxidos são do tipo hematita (Fe_2O_3). Estas partículas podem ser visualizadas de duas formas (BOWEN; WESTCOTT, 1982):

1. Policristalinas e têm aparência alaranjada quando vistas na luz branca refletida, conforme Fig. 36 a seguir, ou na luz polarizada refletida, conforme Fig. 37;
2. As partículas de óxido são planas e assemelham-se às partículas de desgaste severo, exceto que são acinzentadas quando refletidas pela luz branca, e têm aparência marrom-avermelhadas quando vistas através da luz branca transmitida. A Fig. 38 representa essas formas de visualização.

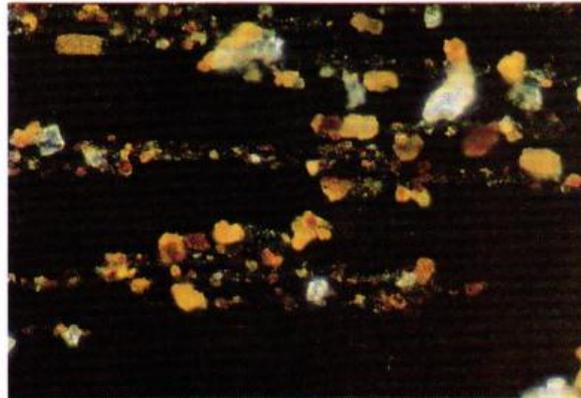
Figura 36 – Partículas policristalinas vistas através da luz branca refletida



Opt. M. 400X |— 50 μ m —|

Fonte: Bowen e Westcott (1982).

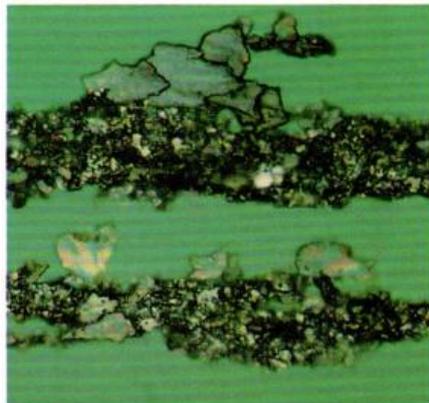
Figura 37 – Partículas policristalinas vistas através da luz polarizada refletida



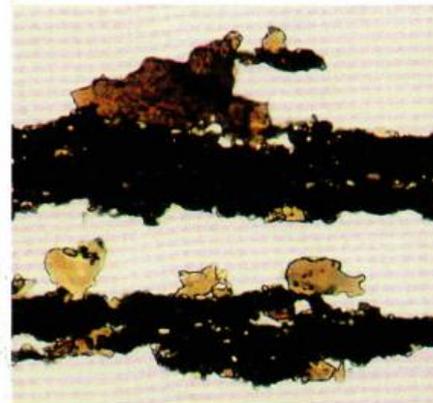
Opt. M. 400X |— 50 μ m —|

Fonte: Bowen e Westcott (1982).

Figura 38 – Partículas de óxido de ferro vermelho



Opt. M. 1000X |— 20 μ m —|



Opt. M. 1000X |— 20 μ m —|

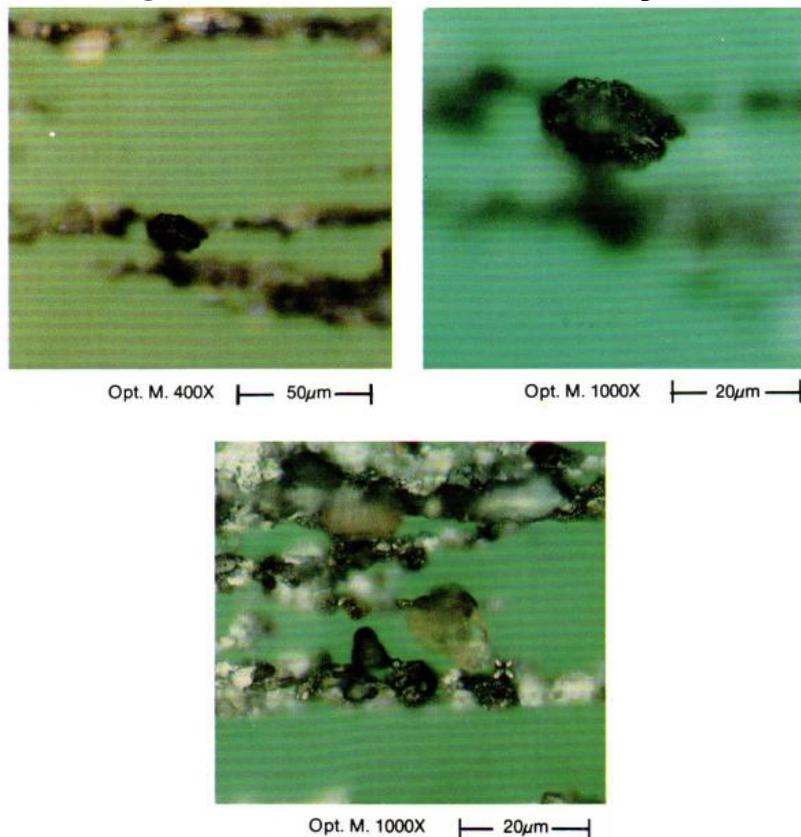
Fonte: Bowen e Westcott (1982).

2.2.7.6.2 Partículas de óxido preto (*black oxides*)

As partículas de óxido de ferro preto apresentam coloração cinza escuro-preto e são resultantes de uma condição mais severa de lubrificação inadequada do que as partículas de óxido vermelho. Vale ressaltar que a presença de umidade no lubrificante não produz óxidos pretos, somente vermelhos. Normalmente, o óxido preto está presente na forma de magnetita (Fe_3O_4) (BOWEN; WESTCOTT, 1982).

A Fig. 39 representa esse tipo de partícula.

Figura 39 – Partículas de óxido de ferro preto

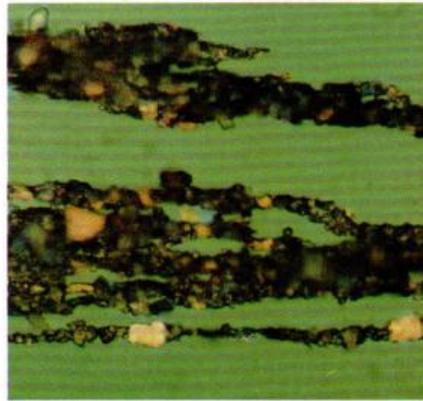


Fonte: Bowen e Westcott (1982).

Além disso, Bowen e Westcott (1982) afirmam que partículas de desgaste de ferro parcialmente oxidadas são conhecidas como óxidos-metálicos escuros. Estas indicam a presença de calor excessivo durante a sua geração. Partículas grandes deste tipo são claramente indicativos de falha catastrófica da superfície do material.

A Fig. 40 a seguir apresenta essas partículas.

Figura 40 – Partículas de óxido-metálico escuro



Opt. M. 1000X |— 20 μ m —|

Fonte: Bowen e Westcott (1982).

2.3 VIBRAÇÃO

As máquinas e equipamentos rotativos originam sinais vibratórios. Cada estrutura de máquina possui uma assinatura de vibração própria. No entanto, mudanças nas características desta assinatura, devido a uma alteração no estado da máquina, podem ser utilizadas para detectar defeitos iniciais, antes de se tornarem críticos (ARATO JÚNIOR, 2004).

Os sinais de vibração coletados nas máquinas e equipamentos geralmente contêm contribuições de vários componentes diferentes, além de ruído. Portanto, o principal desafio do monitoramento da condição é apontar o conteúdo do sinal que está relacionado ao estado do componente monitorado.

Existem diversas técnicas de processamento de sinais utilizadas para extrair informações relevantes de um sinal de vibração, dentre estas, uma estratégia que foi utilizada neste trabalho e explanada a seguir envolve conceitos de Monitoramento de Integridade Estrutural (SHM).

2.3.1 Monitoramento de Integridade Estrutural

Estruturas de engenharia como pontes, prédios, rodovias, barragens, plataformas de petróleo, sistemas de geração de energia e aeronaves executam um papel fundamental na sociedade moderna, independentemente da cultura, localização geográfica ou desenvolvimento econômico (NOBARI; ALIABADI, 2018). O monitoramento destas estruturas possibilita a redução dos custos relacionados à manutenção e garante segurança

operacional, evitando possíveis eventos catastróficos (SBARUFATTI; MANES; GIGLIO, 2014).

O processo de implementação de uma estratégia de detecção de dano para infraestruturas de engenharias aeroespacial, civil e mecânica é definida como Monitoramento de Integridade Estrutural, do inglês *Structural Health Monitoring* (SHM) (FARRAR; WORDEN, 2007; FIGUEIREDO *et al.*, 2011; FIGUEIREDO; MOLDOVAN; MARQUES, 2013). Esta é certamente uma das ferramentas mais potentes para gerenciamento de infraestruturas (NOBARI; ALIABADI, 2018).

De modo geral, dano pode ser definido como mudanças no material e/ou propriedades geométricas introduzidas em um sistema que afetam seu desempenho atual ou uma performance futura (FIGUEIREDO *et al.*, 2011).

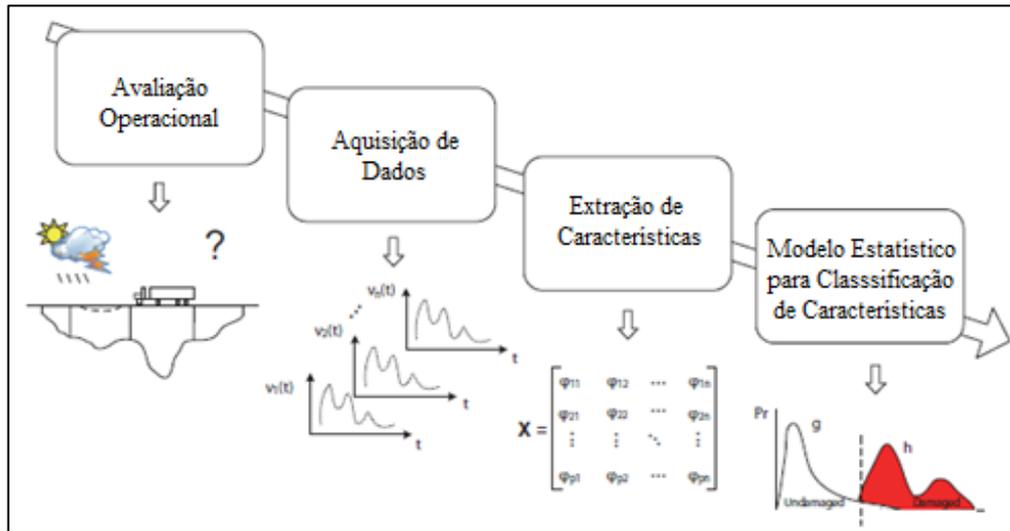
O processo de identificação de dano pode ser classificado em detecção, diagnóstico e prognóstico. A princípio, a existência de dano é investigada através de alterações das propriedades físicas da estrutura, como massa, frequência natural e fator de amortecimento. Em seguida, a localização, tipo e severidade do dano é analisada na etapa de diagnóstico. Enfim, a etapa de prognóstico propõe prever o comportamento estrutural e determinar a vida útil remanescente (FARRAR; WORDEN, 2007; FIGUEIREDO *et al.*, 2011).

O conceito de SHM é baseado em um paradigma de reconhecimento de padrão estatístico, onde algoritmos de aprendizagem (em inglês, *machine learning*) são essenciais para aprender ou modelar o comportamento de uma estrutura através da experiência (dados do passado), seguindo o mesmo princípio do cérebro humano, afim de analisar muitos dados e apresentar um reconhecimento de padrão para identificação de dano (FIGUEIREDO *et al.*, 2011; FIGUEIREDO; MOLDOVAN; MARQUES, 2013).

Farrar e Worden (2007) e Figueiredo *et al.* (2011) definem que o processo de SHM pode ser dividido em quatro estágios:

1. Avaliação operacional;
2. Aquisição de dados;
3. Extração de características; e
4. Desenvolvimento de um modelo estatístico para classificação das características.

Figura 41 – O processo de SHM baseado no paradigma de reconhecimento de padrão estatístico



Fonte: Adaptado de Nobari e Aliabadi (2018).

Assim, tem-se que SHM envolve a observação de um sistema ao longo do tempo usando medidas de respostas amostradas periodicamente por um conjunto de sensores, a extração de características de dano destas medidas, e a análise estatística destas características para determinar a condição atual da integridade de uma estrutura (FIGUEIREDO; MOLDOVAN; MARQUES, 2013).

Pode-se dizer que há duas abordagens principais em SHM: *physics-based* ou *model-based* e *data-based*. O primeiro utiliza a técnica do problema inverso para calibrar modelos numéricos, por exemplo o método dos elementos finitos, e tenta identificar o dano relacionando os dados medidos das estruturas com os dados estimados pelos modelos (NOBARI; ALIABADI, 2018).

Já o segundo está relacionado com o campo de *machine learning*, onde algoritmos de aprendizagem são essenciais para analisar dados e apresentar um reconhecimento de padrão para identificação de dano. Esta segunda abordagem pode ser aplicada em *supervised* ou *unsupervised learning* (NOBARI; ALIABADI, 2018).

Supervised learning refere-se ao caso onde dados de condições não danificadas e danificadas estão disponíveis para treinar os algoritmos. Já *unsupervised learning* refere-se ao caso onde somente as condições danificadas estão disponíveis para o treinamento de dados (NOBARI; ALIABADI, 2018).

Na literatura podem ser encontrados diferentes abordagens aplicadas nos métodos de monitoramento, sendo a análise do comportamento vibracional de estruturas um dos seus principais representantes.

Nesta dissertação foi proposta a aplicação de um algoritmo de aprendizagem para modelar o comportamento dinâmico estrutural, sob a influência de lubrificantes, através da experiência, seguindo o mesmo princípio do sistema imunológico biológico, afim de analisar uma enorme quantidade de dados e apresentar um reconhecimento de padrão para a identificação de dano.

A seguir será exposto de forma detalhada o conceito de Sistema Imunológico Artificial (SIA), ramo dentro do Monitoramento de Integridade Estrutural.

2.3.2 Sistema Imunológico Artificial

Pesquisadores, desde os tempos antigos, sempre tiveram interesse na biosfera e obtiveram inspiração das estruturas e funções dos sistemas biológicos e de seus mecanismos reguladores. Desde meados do século XX, pesquisas se concentram na simulação de sistemas biológicos, especialmente nas estruturas e funções dos seres humanos (YING TAN, 2016).

O Sistema Imunológico Biológico (SIB) tornou-se uma área emergente de pesquisa em bioinformática, assim dentre as pesquisas inspiradas nos fenômenos naturais, destacam-se as que estudam os mecanismos biológicos de defesa do corpo humano, buscando teorias e conceitos capazes de proporcionar o desenvolvimento de novas técnicas e algoritmos computacionais para a solução de problemas reais (CASTRO, 2001; YING TAN, 2016).

O SIB é um sistema altamente complexo constituído de células, moléculas, tecidos e órgãos responsáveis pela defesa do organismo contra agentes patógenos infecciosos (vírus, bactérias, fungos, protozoários, vermes, entre outros). Para garantir a proteção do corpo humano, o SIB precisa ser capaz de distinguir as células e moléculas do próprio corpo, denominadas de próprio (*self*), dos antígenos invasores, denominadas de não- próprio (*nonself*) (CASTRO, 2001; YING TAN, 2016).

Estas características atraíram engenheiros e desenvolvedores de sistemas que propuseram diversos modelos matemáticos baseados em princípios de imunologia no desenvolvimento de ferramentas computacionais. Estas ferramentas são conhecidas como Sistemas Imunológicos Artificiais (SIA) (CASTRO, 2001; YING TAN, 2016).

Portanto, o SIA é um sistema de inteligência computacional inspirado nos princípios de imunologia do sistema imunológico biológico. O ponto chave para projetá-lo é aproveitar ao máximo os conceitos da imunologia e replicar a eficácia e a capacidade do SIB nos sistemas computacionais (YING TAN, 2016).

Na literatura encontra-se outras definições para o SIA. Dasgupta (1999) o descreve como uma metodologia inteligente inspirada pelo sistema imunológico para a solução de problemas do mundo real. Ainda, Sotiropoulos e Tsihrintzis (2017) definem o SIA como sistemas adaptativos, inspirados na imunologia teórica e nas funções, princípios e modelos observados, aplicados à solução de problemas.

Dasgupta (1999), Castro (2001) e Ying Tan (2016) afirmam que o sistema imune biológico possui diversas características e propriedades específicas que servem de inspiração para o sistema imune artificial na resolução de problemas. Dentre estas destacam-se:

- Reconhecimento;
- Extração de recursos;
- Diversidade;
- Aprendizado;
- Memória;
- Detecção;
- Adaptação; e
- Organização.

Vale ressaltar que os sistemas imunológicos artificiais vêm sendo utilizados em diversas áreas, tais como: segurança computacional, robótica, controle, análise de dados, reconhecimento de padrões, detecção e diagnóstico de falhas e anomalias, entre outras aplicações (DASGUPTA, 1999; CASTRO, 2001; YING TAN, 2016).

Há uma variedade de algoritmos e modelos imunes em um sistema imunológico artificial. Dentre os principais algoritmos computacionais que modelam os diferentes mecanismos e teorias destacam-se: modelos de medula óssea, algoritmo de seleção negativa, modelos contínuos de rede imunológica e algoritmo de seleção clonal (CASTRO, 2001).

Dentre estes algoritmos, nesta dissertação foi aplicado o Algoritmo de Seleção Negativa (ASN), assim será lhe dado um enfoque a seguir.

2.3.3 Algoritmo de Seleção Negativa

O mecanismo de seleção negativa foi o primeiro dentre os vários outros do sistema imunológico a ser explorado como paradigma computacional para o desenvolvimento de um SIA (SOTIROPOULOS; TSIHRINTZIS, 2017).

O algoritmo de seleção negativa (ASN) foi proposto por Forrest *et al.* (1994) para detecção de alterações computacionais inspirado no princípio de discriminação próprio-não-próprio executado pelas células T no timo do sistema imune natural (DASGUPTA, 1999; CASTRO, 2001).

Assim, este algoritmo consiste na criação de detectores capazes de identificar elementos não pertencentes à classe dos elementos que se deseja estudar, ou seja, capazes de distinguir entre os elementos próprios e não próprios do sistema. O algoritmo é executado em duas fases, a primeira chamada fase de treinamento e a segunda de fase de teste (DASGUPTA, 1999; CASTRO, 2001; YING TAN, 2016; SOTIROPOULOS; TSIHRINTZIS, 2017).

Na fase de treinamento, também conhecida como fase de sensoriamento ou geração, são definidos os detectores incapazes de identificar as cadeias próprias. A seguir destacam-se os passos principais para a execução desta fase (CASTRO, 2001; SOTIROPOULOS; TSIHRINTZIS, 2017):

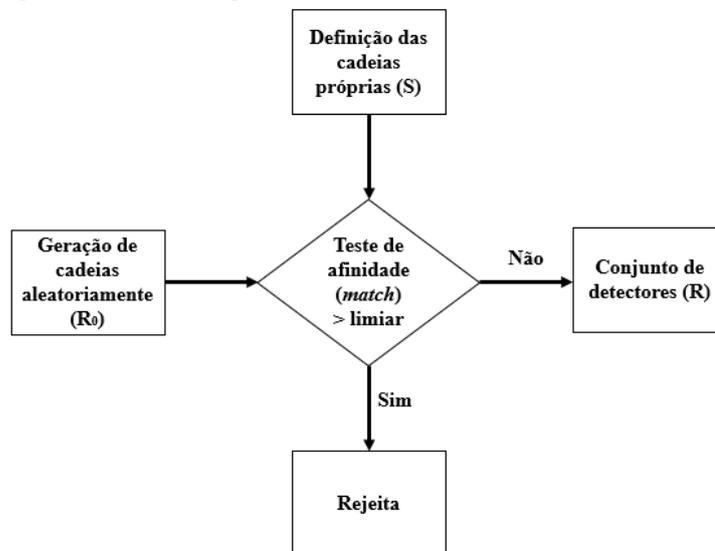
1. Definir o conjunto de cadeias próprias (S), de tamanho limitado, que se deve proteger;
2. Gerar cadeias aleatoriamente (R_0);
3. Avaliar a afinidade (*match*) entre cada uma das cadeias geradas aleatoriamente (R_0) e as cadeias próprias (S);
4. Caso a afinidade seja superior a um limiar pré-estabelecido, significa que houve um reconhecimento do conjunto próprio e, então, é preciso rejeitar a cadeia. Caso contrário, armazene-a em um conjunto de detectores (R).

Já na fase de teste, normalmente referida como fase de monitoramento ou detecção, procura-se detectar cadeias não-próprias utilizando o conjunto de detectores gerados na fase de sensoriamento. Os principais passos para a execução desta fase são listados a seguir (CASTRO, 2001; SOTIROPOULOS; TSIHRINTZIS, 2017):

1. Avaliar a afinidade (*match*) entre cada uma das cadeias do conjunto próprio (S) e o conjunto de detectores (R) gerados na primeira fase;
2. Caso a afinidade seja superior a um limiar estipulado, então, um elemento não-próprio foi identificado. Em outras palavras, ocorreu uma anomalia.

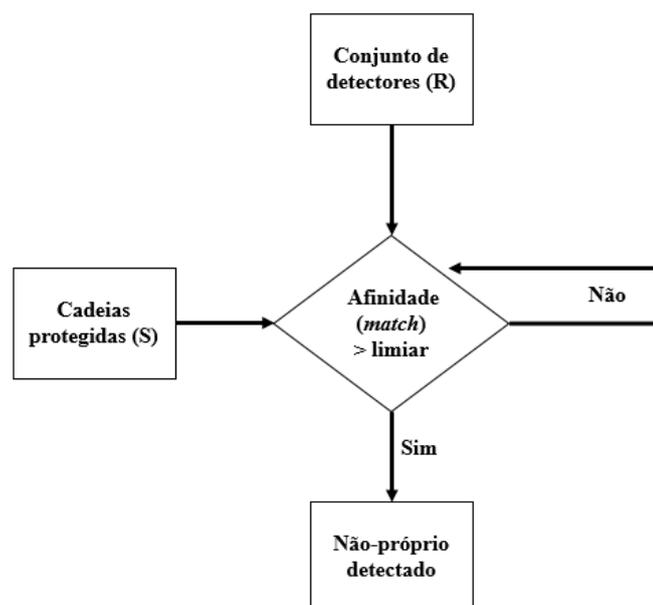
As Fig. 42 e 43, ilustram, respectivamente, os fluxogramas das fases de sensoriamento e monitoramento do algoritmo de seleção negativa.

Figura 42 – Fluxograma da fase de sensoriamento do ASN



Fonte: Adaptado de Sotiropoulos e Tsihrintzis (2017).

Figura 43 – Fluxograma da fase de monitoramento do ASN



Fonte: Adaptado de Sotiropoulos e TsihrintziS (2017).

Assim, pode-se perceber que o processo iterativo realizado com os detectores permite uma abrangência na identificação dos elementos não-próprios. Contudo, os detectores procuram identificar no conjunto que se deseja proteger padrões que são novos em relação ao que é considerado normal, dessa forma, eles não procuram por nenhuma falha em particular (CASTRO, 2001).

2.4 MÉTODO ESTATÍSTICO

2.4.1 Teste Q de Dixon

O teste Q, ou teste de valor extremo de Dixon, é um teste estatístico simples, amplamente utilizado para decidir se um resultado suspeito (*outlier*) deve ser mantido ou rejeitado (RORABACHER, 1991; SKOOG *et al.*, 2006, 2014).

Aplica-se este teste quando se tem poucas amostras (com tamanho inferior ou igual a 30) e o valor suspeito apresenta um valor muito menor ou maior em relação ao resto dos dados. Este teste supõe que o conjunto de dados sem o valor atípico suspeito é normalmente distribuído (DIXON, 1951; RORABACHER, 1991).

Segundo Rorabacher (1991), embora muitos testes estatísticos foram propostos para lidar com a rejeição de valores anormais (*outliers*), nota-se que na grande maioria das publicações, o teste Q de Dixon foi estabelecido como método principal para a rejeição de valores suspeitos. Skoog *et al.* (2006, 2014) corrobora Rorabacher (1991) e afirma que o teste Q é geralmente reconhecido como um método adequado para a tomada de decisões.

O teste Q de Dixon consiste em calcular os valores de Q para os resultados que se suspeitam estarem discrepantes. Em seguida, tais valores são comparados com os valores críticos de Q (Q_{crit}) tabelados em função do número de variáveis do conjunto de dados (n) e do nível de confiança desejado.

Os níveis de confiança comumente utilizados nos testes estatísticos envolvendo rejeição de dados são de 99% ($\alpha = 0.01$), 95% ($\alpha = 0.05$) e 90% ($\alpha = 0.10$). Quanto mais alto o nível de confiança utilizado, mais conservadora é a abordagem estatística. Rorabacher (1991) afirma que utilizar o nível de confiança de 95% proporciona uma abordagem satisfatória.

Caso o valor de Q calculado seja superior ao valor de Q tabelado (Q_{crit}), o valor suspeito é rejeitado, pois é considerado *outlier*, ou seja, discrepante. Tal análise é feita para cada um dos valores suspeitos de serem discrepantes em um determinado conjunto de dados.

Para o cálculo do Q de Dixon, primeiramente, os valores existentes em um conjunto de dados com n variáveis devem ser colocados em ordem crescente. De acordo com a Eq. (11), a grandeza Q é o valor absoluto da diferença entre o resultado questionável (X_q) e seu vizinho mais próximo (X_p), dividido pela faixa f do conjunto inteiro (SKOOG *et al.*, 2006, 2014).

$$Q = \frac{|X_q - X_p|}{f} \quad , \text{ sendo } f = X_n - X_1 \quad (11)$$

Em que:

Q = Valor de Q de *Dixon* calculado;

X_q = Valor suspeito de ser discrepante (resultado questionável);

X_p = Valor superior seguinte ao valor suspeito;

X_n = Maior valor do conjunto de dados; e

X_1 = Menor valor do conjunto de dados.

Dixon (1951) e Rorabacher (1991), no entanto, apresentam a Eq. (11) relacionada a um intervalo específico n de variáveis, conforme a seguir. Ressalta-se que estes equacionamentos são para testar o extremo menor (X_1), enquanto que as equações entre parênteses são para testar o extremo maior (X_n). Nota-se que os valores estão ordenados de forma que $X_1 < X_2 < \dots < X_{n-1} < X_n$.

$$Q = \frac{X_2 - X_1}{X_n - X_1} \left(\text{ou } \frac{X_n - X_{n-1}}{X_n - X_1} \right) \quad , \text{ para } 3 \leq n \leq 7 \quad (12)$$

$$Q = \frac{X_2 - X_1}{X_{n-1} - X_1} \left(\text{ou } \frac{X_n - X_{n-1}}{X_n - X_2} \right) \quad , \text{ para } 8 \leq n \leq 10 \quad (13)$$

$$Q = \frac{X_3 - X_1}{X_{n-1} - X_1} \left(\text{ou } \frac{X_n - X_{n-2}}{X_n - X_2} \right) \quad , \text{ para } 11 \leq n \leq 13 \quad (14)$$

$$Q = \frac{X_3 - X_1}{X_{n-2} - X_1} \left(\text{ou } \frac{X_n - X_{n-2}}{X_n - X_3} \right) \quad , \text{ para } 14 \leq n \leq 30 \quad (15)$$

Os valores críticos de Q para as estatísticas dos testes de Dixon são tabulados em Rorabacher (1991), conforme Tab. 3.

Tabela 3 – Valores Críticos para o Cociente de Rejeição, Q

Número de Observações (n)	Q_{crit} (Rejeitar se $Q > Q_{crit}$)		
	90% de Confiança ($\alpha = 0.10$)	95% de Confiança ($\alpha = 0.05$)	99% de Confiança ($\alpha = 0.01$)
3	0.941	0.970	0.994
4	0.765	0.829	0.926
5	0.642	0.710	0.821
6	0.560	0.625	0.740
7	0.507	0.568	0.680
8	0.468	0.526	0.634
9	0.437	0.493	0.598
10	0.412	0.466	0.568
11	0.392	0.444	0.542
12	0.376	0.426	0.522
13	0.361	0.410	0.503
14	0.349	0.396	0.488
15	0.338	0.384	0.475

Fonte: Adaptado de Rorabacher (1991).

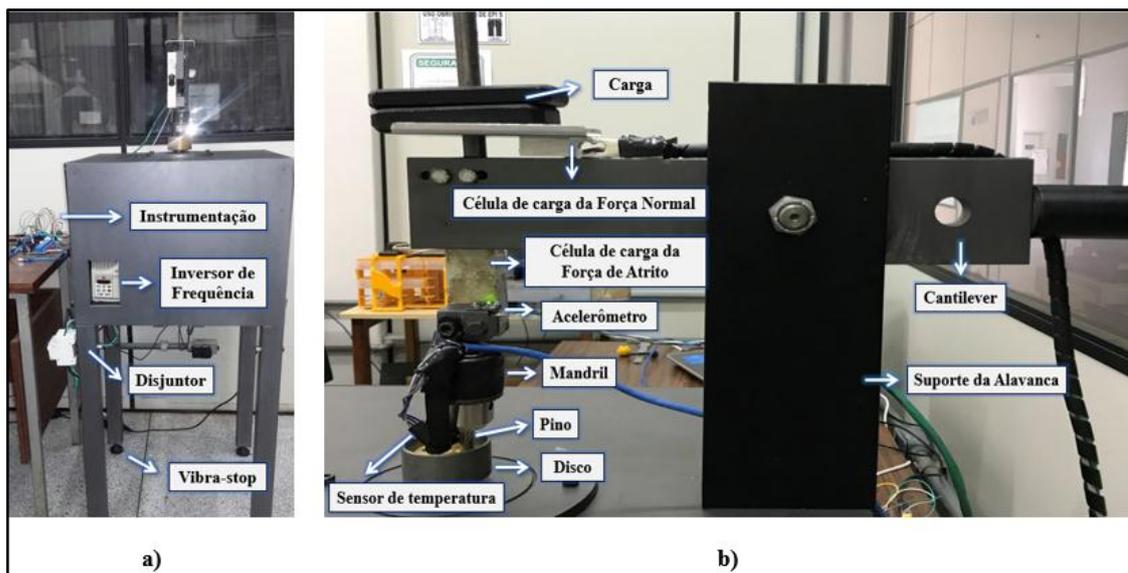
3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo será apresentado a metodologia experimental utilizada no desenvolvimento da dissertação.

Para verificar a eficiência das biograxas sintetizadas foram utilizadas duas técnicas de manutenção preditiva: análise de vibrações e análise de lubrificantes. Os ensaios foram realizados em uma bancada experimental do tipo *pin on disk*, desenvolvida por Galvão *et al.* (2019), no Laboratório de Tribologia - Laboratório de Análises de Partículas em Óleos Lubrificantes (LAPO), localizado no bloco M3 – Mecânica dos Sólidos, do departamento de engenharia mecânica da UNESP de Ilha Solteira.

A Fig. 44 ilustra o tribômetro utilizado nos experimentos. Destaca-se na Fig. 44a, a vista frontal do equipamento, e em Fig. 44b, sua vista lateral.

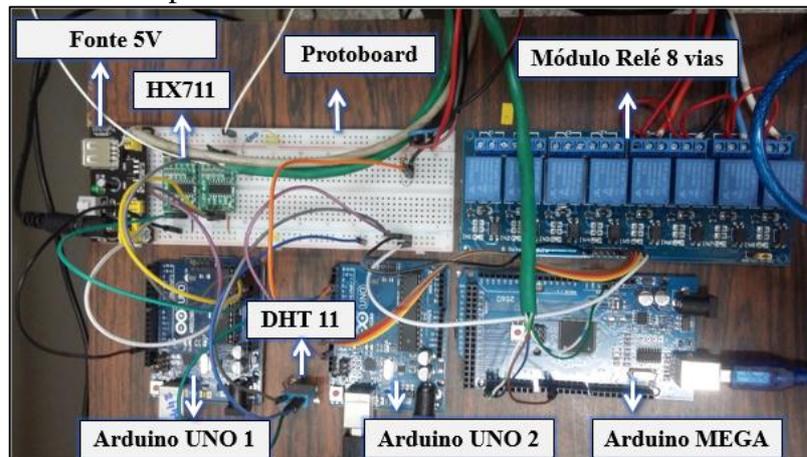
Figura 44 – Pin-on-disk: a) vista frontal e b) vista lateral do tribômetro



Fonte: Adaptado de Galvão *et al.* (2019).

Além disso, a Fig. 45 a seguir destaca os componentes elétricos e eletrônicos utilizados na instrumentação do equipamento. Segundo Galvão *et al.* (2019), esta instrumentação é de baixo custo e controlada através de uma plataforma com código aberto (Arduino).

Figura 45 – Componentes elétricos e eletrônicos utilizados no tribômetro



Fonte: Adaptado de Galvão *et al.* (2019).

Os componentes utilizados para o controle da máquina foram: um microcontrolador Arduino UNO, um inversor de frequência (Marca: WEG, Modelo: CFW 08), um sensor infravermelho reflexivo E18 – D80NK, um disjuntor e um módulo relé, 5 volts, de 8 canais, sendo que para esta aplicação apenas 4 canais foram necessários (GALVÃO *et al.*, 2019).

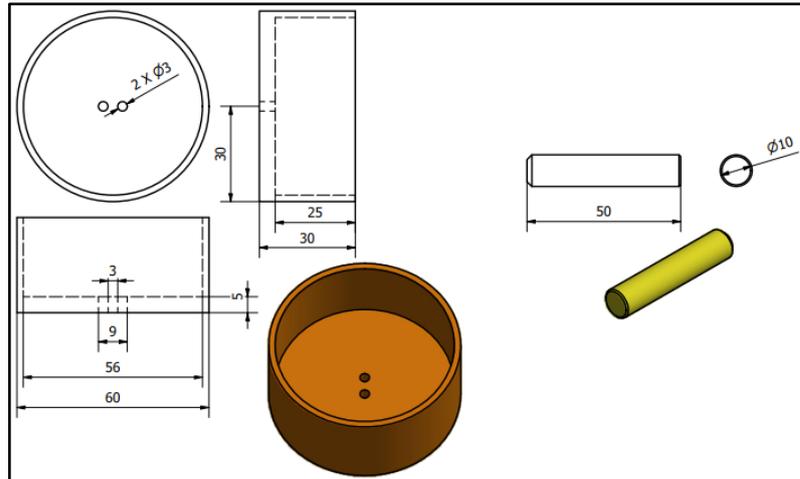
Para o sistema de aquisição das forças normal e de atrito foram necessários à utilização de outro microcontrolador Arduino UNO, duas células de carga e dois módulos conversores HX711. Foram utilizados os sensores DHT11 e IR MLX90614 para o monitoramento da umidade e temperatura ambiente, e da temperatura da superfície de contato entre o pino e o disco, respectivamente (GALVÃO *et al.*, 2019).

Além disso, um acelerômetro MPU6050 e um microcontrolador Arduino MEGA foram utilizados para a aquisição dos sinais de vibração (GALVÃO *et al.*, 2019).

3.1 PROCEDIMENTOS

O trabalho desta dissertação consiste na utilização do tribômetro referido acima para simular o atrito entre materiais sob condições lubrificadas (graxas e biograxas). Para a realização dos ensaios, o material utilizado, tanto para o pino quanto para o disco, foi o aço SAE 1040, cuja densidade é 7.845 g/cm^3 . O pino apresenta 50 mm de comprimento e 10 mm de diâmetro, enquanto o disco apresenta 56 mm de diâmetro e 5 mm de espessura. Ambos podem ser observados na Fig. 46 a seguir.

Figura 46 – Ilustração do pino e disco de aço SAE 1040 utilizados nos ensaios

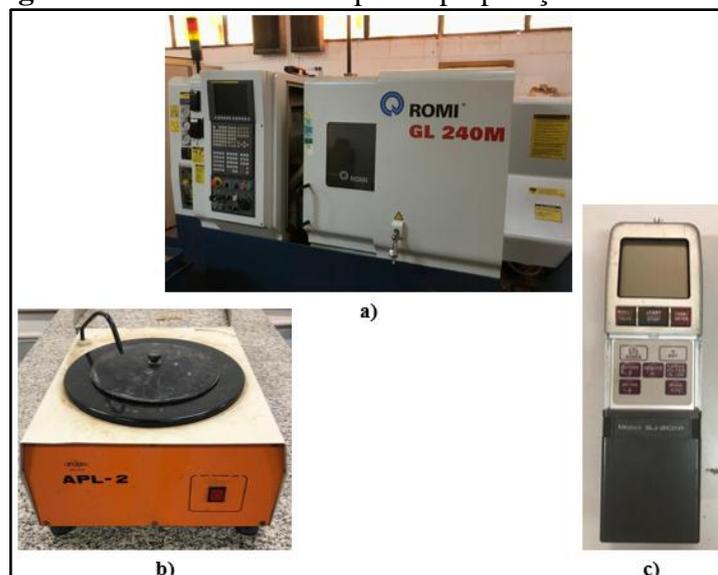


Fonte: Elaboração do próprio autor.

Os procedimentos utilizados para confecção e preparação das amostras dos pares tribológicos podem ser vistos na Fig. 47. Todos os equipamentos pertencem aos laboratórios do bloco M1 – Materiais e Processos de Fabricação, do departamento de engenharia mecânica da UNESP de Ilha Solteira.

As amostras foram usinadas em um torno CNC (marca: Romi, modelo: GL 240M), ilustrado na Fig. 47a. Afim de melhorar a rugosidade superficial, as mesmas foram lixadas com granulação de 100 a 1500 através de uma lixadeira (marca: Arotec, modelo: APL-2), representada na Fig. 47b, e para determinar a rugosidade foi utilizado um rugosímetro (marca: Mitutoyo, modelo: SJ-201P), ilustrado na Fig. 47c.

Figura 47 – Procedimentos para a preparação das amostras



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Com o intuito de determinar a dureza do aço SAE 1040, dado importante a ser utilizado nas equações de desgaste adesivo por deformação plástica, foi utilizado um durômetro de bancada Rockwell, representado na Fig. 48. Para o ensaio de dureza do aço foi utilizado a escala *Rockwell Hardness Number* (HRA), sendo aplicada uma carga de 60 kgf e penetrador cone 120° de diamante.

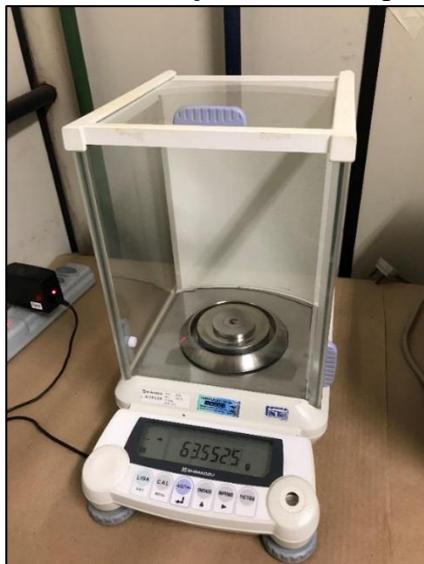
Figura 48 – Durômetro utilizado no ensaio de dureza superficial



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Além disso, antes e depois da realização dos ensaios, foi necessário determinar as massas das amostras. Para isso, utilizou-se uma balança analítica de precisão com uma resolução de 0,0001 g e capacidade de pesagem de até 320 g (marca: Shimadzu, modelo: AUX320). Esta está ilustrada na Fig. 49 e pertence ao Laboratório do GDAM, do departamento de física e química da UNESP de Ilha Solteira.

Figura 49 – Balança analítica de precisão



Fonte: Elaboração do próprio autor.

3.2 PARÂMETROS EXPERIMENTAIS

Os parâmetros utilizados nos ensaios estão representados na Tab. 4. Vale ressaltar que cada experimento foi repetido 3 vezes.

Tabela 4 – Parâmetros definidos para os experimentos

Parâmetros	Valores
Distância [m]	1000
Velocidade de rotação [rpm]	60
Velocidade [m/s]	0,0879
Raio da faixa de atrito [mm]	14
Carga [kg]	1,02
Força Normal [N]	10
Temperatura ambiente [°C]	22 - 24
Umidade relativa [%]	32 - 35
Lubrificante (g)	5

Fonte: Elaboração do próprio autor.

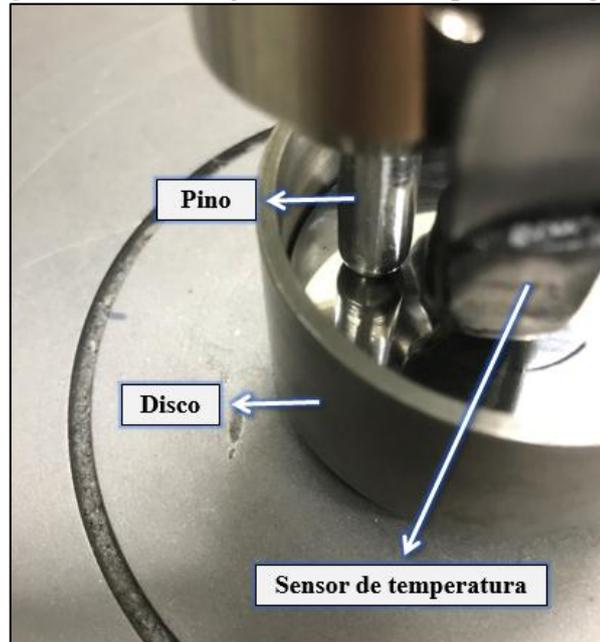
Além disso, a taxa de amostragem utilizada para a aquisição de sinais da célula de carga, temperatura e umidade foi de 1 Hz, correspondente a velocidade de deslizamento. Isso significa que a cada ciclo é feito a aquisição de um sinal, assim têm-se um sincronismo entre a aquisição de dados e controle do equipamento. Assim, pode-se obter o gráfico do coeficiente de atrito pela distância de deslizamento (GALVÃO *et al.*, 2019).

3.3 EXPERIMENTOS

Antes de iniciar a pesagem e a realização dos ensaios, os pares tribológicos (pino-disco) foram higienizados com álcool etílico e secados posteriormente, com o intuito de remover quaisquer impurezas existentes, como partículas sólidas e agentes contaminantes.

A Fig. 50 a seguir ilustra a montagem do par tribológico no tribômetro.

Figura 50 – Ilustração detalhada do par tribológico



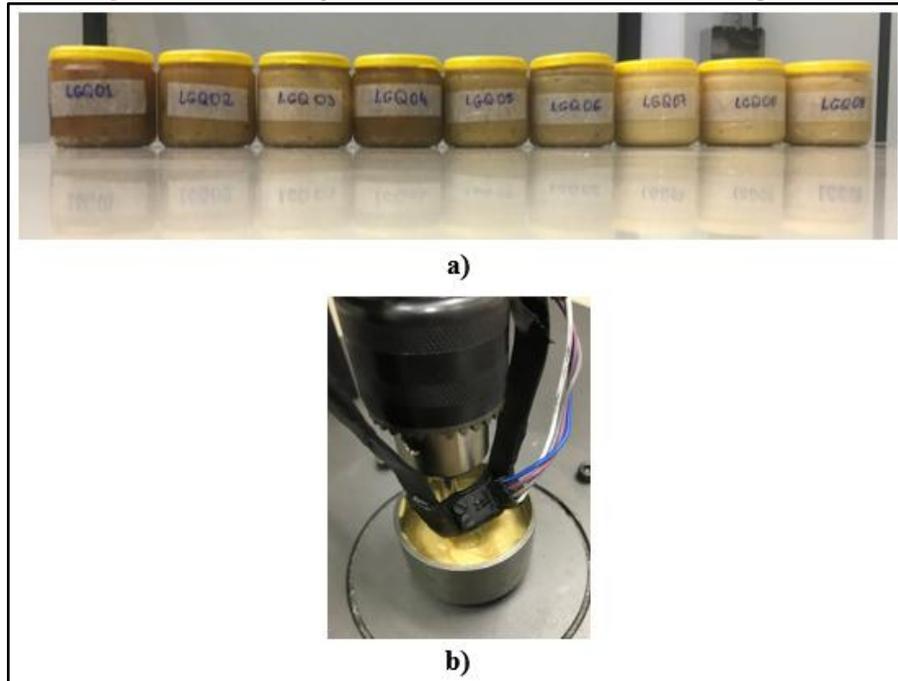
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Em relação aos lubrificantes, biograxas sintetizadas e graxas minerais comerciais, estes estão representados nas Fig. 51 e 52 e descritos na Tab. 5 a seguir.

As biograxas foram subdivididas em dois grupos: graxas à base de sódio e graxas à base de lítio. No total tem-se 9 amostras denominadas LGQ01 à LGQ09. Já as graxas comerciais são divididas em duas: graxa azul FAG multiuso à base de lítio e graxa branca Yourlub à base de cálcio e dióxido de titânio.

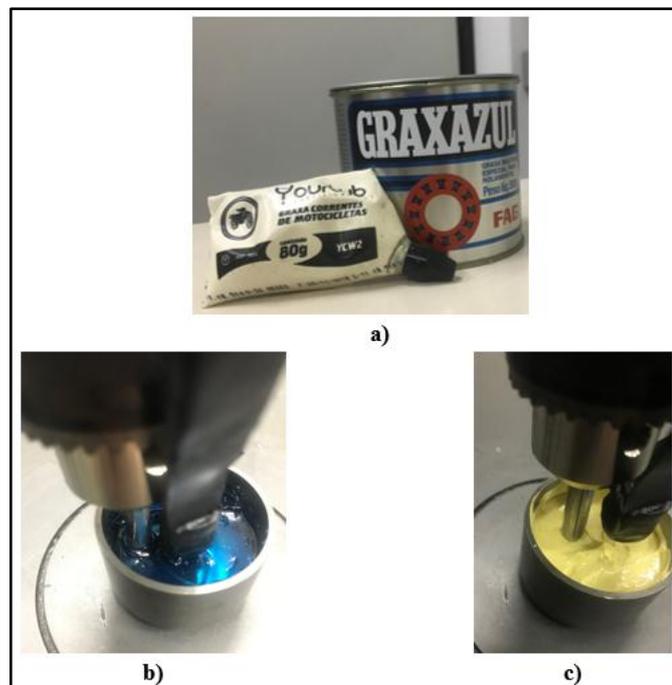
Cabe destacar que as biograxas desenvolvidas não possuem aditivos em sua formulação, fator extremamente positivo, já que as graxas comerciais possuem muitos aditivos em sua composição, sendo eles responsáveis pelo alto valor de custo destas graxas.

Figura 51– Ilustração detalhada das amostras de biograxas



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 52– Ilustração detalhada das amostras de graxas minerais



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 5 – Descrição dos lubrificantes

Legenda	Composição	Ponto de Gota (°C)	Penetração trabalhada (1/10 mm)	Grau NLGI
BIOGRAXAS				
LGQ01	Óleo de soja à base de sódio (10%)	103	365	0
LGQ02	Óleo de soja à base de sódio (20%)	118	320	1
LGQ03	Óleo de soja à base de sódio (30%)	149	279	2
LGQ04	Óleo de soja à base de lítio (10%)	144	263	2
LGQ05	Óleo de soja à base de lítio (20%)	161	239	3
LGQ06	Óleo de soja à base de lítio (30%)	173	220	3
LGQ07	Óleo de soja à base de lítio (10%)	133	390	0
LGQ08	Óleo de soja à base de lítio (20%)	156	368	0
LGQ09	Óleo de soja à base de lítio (30%)	165	346	1
GRAXAS				
Azul	Óleo mineral à base de lítio (7-10%)	201	290	2
Branca	Óleo mineral à base de cálcio (8-10%)	105	295	2

Fonte: Elaboração do próprio autor.

As amostras em destaque amarelo e laranja foram desenvolvidas a partir de um processo direto de saponificação do bio-óleo, nas proporções de 10, 20 e 30% de hidróxido em relação ao óleo básico, permitindo assim a produção das biograxas.

Já as amostras em destaque verde foram desenvolvidas misturando o sabão, produzido previamente em um processo de síntese separado, com o mesmo bio-óleo nas proporções de 10, 20 e 30% em relação ao óleo básico.

3.3.1 Aquisição e processamento de sinais

A aquisição de dados (forças normal e de atrito, temperatura de contato entre o par tribológico e vibração) apresentada nesta dissertação foi feita via microcontroladores Arduinos, e o processamento destes dados ocorreu via *software* Octave.

Vale ressaltar que os sinais de vibração, obtidos no domínio do tempo e transformados para o domínio da frequência, foram analisados através de um algoritmo de sistema imunológico artificial de seleção negativa, com o objetivo de realizar um diagnóstico, identificando e classificando estes sinais em falhas ou não-falhas.

Coefficientes de atrito (μ) podem ser determinados pela razão entre as forças de atrito (Fat) e as cargas normais (N), conforme demonstrado anteriormente no capítulo 2 através da Eq. (1). Para uma melhor visualização dos dados, utilizou-se um filtro de janela média quadrática, representado pela Eq. (16).

$$F(RMS) = \sqrt{\frac{1}{NL} \sum_{j=1}^{NL} |F_j|^2} \quad (16)$$

Onde L é o número de janelas utilizadas, NL é o número de pontos em cada janela e é sempre menor do que N ($NL < N$), número total de pontos do sinal.

A raiz do valor quadrático médio, do inglês *root-mean-square* (RMS), ou simplesmente valor eficaz, é uma medida estatística da magnitude de uma quantidade variável. Pode ser calculada para uma série de valores discretos ou para uma função variável contínua. O nome deriva do fato de que é a raiz quadrada da média aritmética dos quadrados dos valores (STOICA, MOSES, 2005; SHIN, HAMMOND, 2008; OPPENHEIM, SCHAFER, 2012).

3.3.2 Quantificação do desgaste

Uma forma de quantificar o desgaste de materiais é utilizando a Eq. (17) a seguir. Primeiramente, é necessário saber a densidade do material (g/cm^3) e a perda de massa (g) após a realização do ensaio. Este desgaste é dado em perda de volume (cm^3 ou mm^3) e deve ser calculado para o pino e disco separadamente.

(17)

$$VL = \frac{ML}{d}$$

Onde VL é a perda de volume, ML é a perda de massa e d é a densidade do material.

Além disso, outra forma de apresentar a quantificação de desgaste é através das equações de desgaste adesivo por deformação plástica determinadas por Archard (1953, 1986), Archard e Hirst (1956) e Ludema e Ajayi (2018), descritas anteriormente no capítulo 2.

Dentre as equações, destacam-se as Eq. (5), Eq. (7) e Eq. (8), que determinam respectivamente, o coeficiente de desgaste, a taxa de desgaste de volume de material removido pela distância de deslizamento e esta mesma taxa de desgaste em função do tempo.

3.3.3 Espectrômetro de raios X

Um método comumente utilizado de análise de uma amostra de lubrificante é a espectroscopia. Esta permite determinar os elementos químicos contidos nas partículas ferromagnéticas, bem como estabelecer a proporção de cada elemento na amostra.

O método espectroscópico, quando emprega radiações eletromagnéticas, no caso de ondas raios X, pode ser feito através de um equipamento conhecido como espectrômetro de raios X. Este (marca: Oxford Instruments, modelo: X-Supreme) está ilustrado na Fig. 53 e pertence ao laboratório de Tribologia.

Figura 53 – Espectrômetro de raios X



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Para a preparação das amostras, considerou-se diluir 1 g de lubrificante em 20 ml de solvente, no caso Hexano. Após total homogeneização, a solução foi inserida em um recipiente específico para utilização no equipamento.

Ressalta-se que no término do procedimento, as soluções das amostras foram reutilizadas em outros processos (PQA e filtragem por membrana), conforme descritos a seguir.

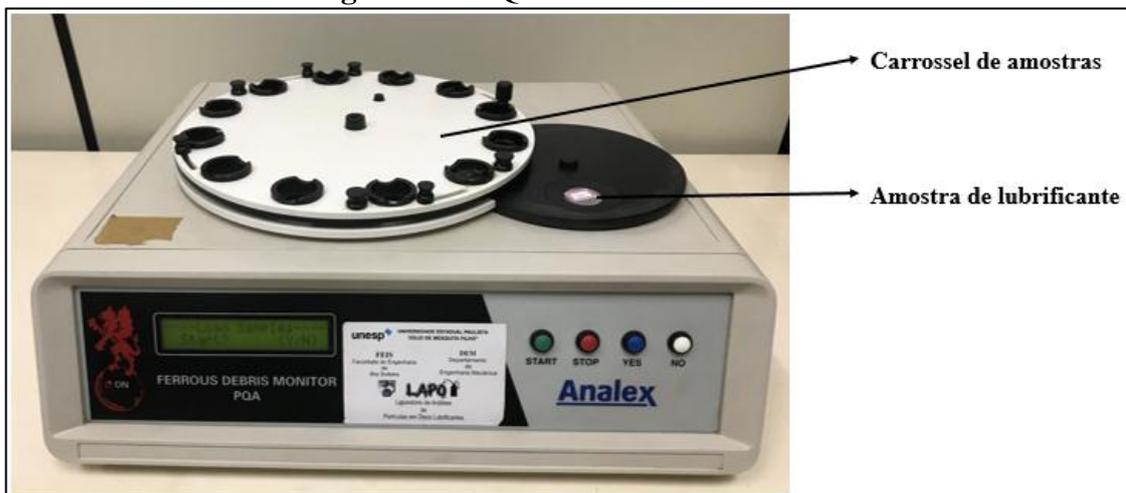
3.3.4 Monitor automático de partículas ferrosas

Afim de monitorar a quantidade de partículas ferromagnéticas presentes nas amostras de lubrificantes, após a realização dos ensaios utilizou-se o monitor automático de partículas (PQA).

Este consiste de um magnetômetro de alta precisão que usa um sistema com duas bobinas e seus campos magnéticos para quantificar a concentração total de partículas ferrosas presentes em uma amostra. Inicialmente, as bobinas permanecem em equilíbrio, no entanto, ao colocar uma amostra de lubrificante contendo partículas ferromagnéticas provocará um desequilíbrio nos campos magnéticos e gerará um sinal que será exibido posteriormente na forma de um índice (índice PQ). Este não possui unidade, mas relaciona-se à massa das partículas.

O PQA utilizado (marca: Kittiwake Developments Ltd, modelo: Analex) pode ser visto na Fig. 54.

Figura 54 – PQA do laboratório LAPO



Fonte: Elaboração do próprio autor.

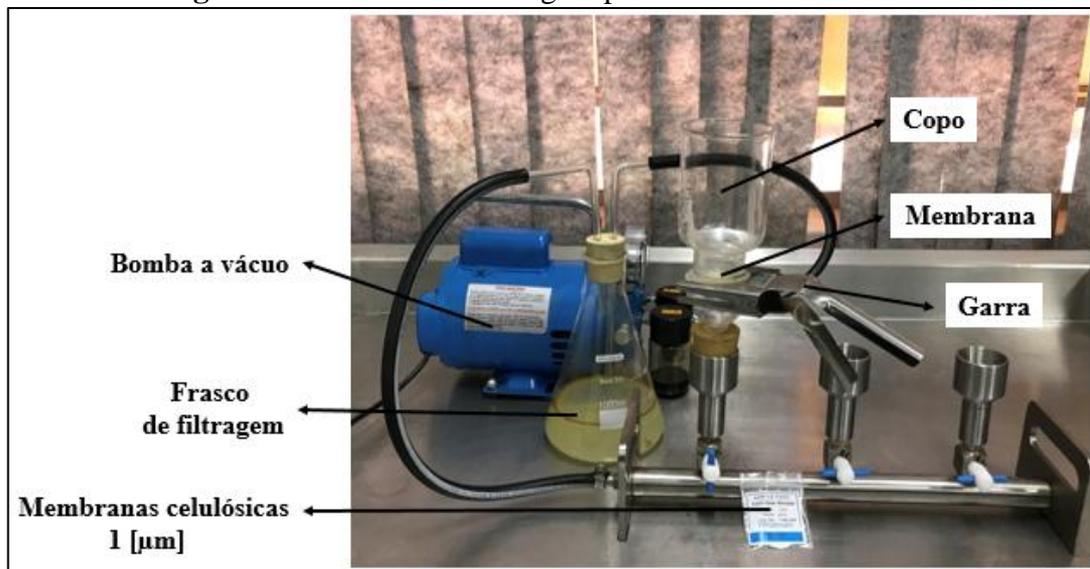
Este equipamento é diretamente controlado por botões montados no painel dianteiro. Para garantir uma qualidade e estabilidade nos resultados, recomenda-se que o instrumento seja configurado e calibrado antes do início das medições. Isto ocorre através de um padrão de calibração, conhecido como padrão 750.

Após o procedimento de calibração, as medições podem ser realizadas e amostras de lubrificantes (neste caso, as soluções) são dispostas em recipientes específicos e alojadas no carrossel de amostras. O processo de medição é repetido 10 vezes e, posteriormente, são calculadas as médias aritméticas dos resultados.

3.3.5 Filtragem por membrana celulósica

A técnica de filtragem por membrana de celulose foi utilizada para estudar os contaminantes sólidos presentes nas amostras de lubrificantes. A Fig. 55 ilustra o sistema de filtragem montado no laboratório de Tribologia.

Figura 55 – Sistema de filtragem por membrana de celulose



Fonte: Elaboração do próprio autor.

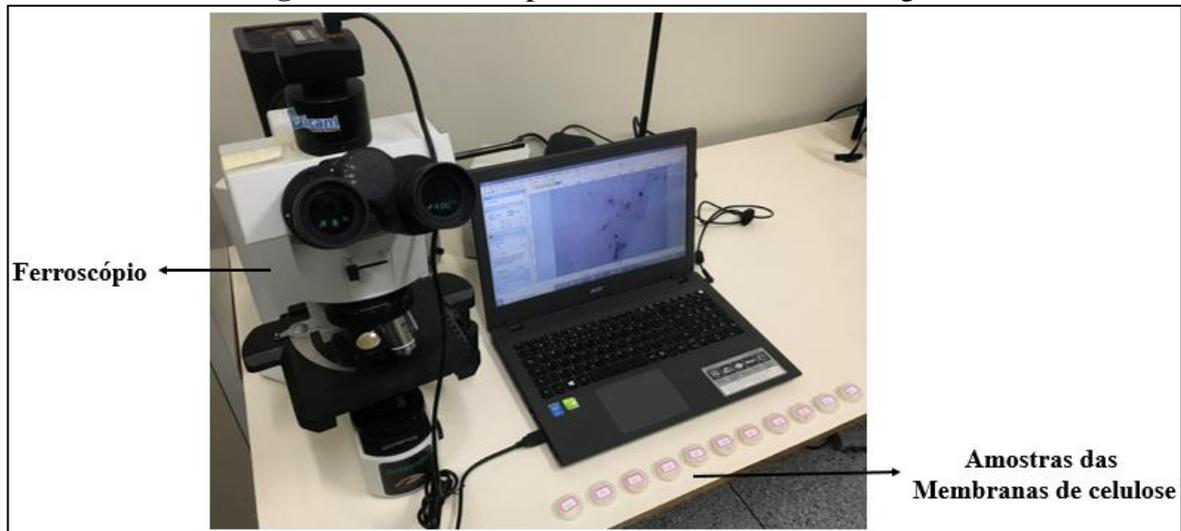
Para a realização da técnica, a solução de cada amostra foi inserida no copo do sistema de filtragem. Membranas celulósicas de porosidade de 1 μm foram consideradas para este procedimento. Além disso, uma bomba a vácuo foi utilizada afim de acelerar o processo de filtração.

3.3.6 Microscópio óptico

Em análises de ferrografia analítica, o microscópio óptico é utilizado para interpretação da morfologia e tamanho das partículas, pois permite uma observação visual para que possam ser identificados os tipos de desgastes. Esta caracteriza uma das fases mais importantes na análise de lubrificantes.

O microscópio óptico ou ferrosópio (marca: Olympus, modelo: BX-41) utilizado nos ensaios está ilustrado na Fig. 56. Após o processo de filtração, as membranas foram analisadas minuciosamente para a detecção de partículas. As amostras foram fotografadas com lentes de aumento de 100 e 500 vezes.

Figura 56 – Ferrosópio do laboratório de Tribologia



Fonte: Elaboração do próprio autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Conforme apresentado no capítulo 3, os experimentos foram realizados em um *pin-on-disk*. Segundo a norma ASTM G99 (2017), para a realização de ensaios, é necessário que as amostras tenham uma rugosidade na média aritmética (R_a) inferior ou igual a $0,1 \mu\text{m}$. Assim, após o processo de usinagem, os pinos e discos foram submetidos à processos de lixamento, atingindo uma rugosidade média de $0,08 \pm 0,01 \mu\text{m}$, conforme ilustrado na Fig. 57.

Figura 57 – Rugosidade média aritmética (R_a) das amostras



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Inicialmente, foram coletados os valores de massa das amostras, e após a realização de cada ensaio, as amostras foram pesadas novamente. O intuito deste processo era determinar a perda de massa (ML), e conseqüentemente, a perda de volume (VL) de material.

Ainda, através do ensaio de dureza superficial, com o uso do durômetro de bancada Rockwell, foi obtido o valor da dureza das amostras, sendo esta, para o aço SAE 1040, igual a 57 HRA. Este valor, para ser aplicado nas equações de desgaste adesivo por deformações plásticas, faz-se necessário realizar duas conversões: a primeira para a dureza Brinell (HBS – *Brinell Hardness Number*) por via de tabela da norma ASTM E140 (ASTM, 2012); e a segunda para a unidade Pascal (Pa) [N/m^2] através de um fator de conversão (3.53), de acordo com Gerdau (2003).

Primeiramente, resultados de coeficientes de atrito, temperaturas de superfície de contato entre pino e disco e quantificações de desgaste são apresentados de forma detalhada. Além disso, testes tribológicos, como o PQA e o espectrômetro de raios X, foram aplicados afim de determinar a concentração de partículas ferromagnéticas nas amostras, e para

caracterizar a natureza destas, após um processo de filtração por membrana celulósica, foi utilizado um Ferrosópio.

Ressalta-se que os resultados experimentais obtidos foram avaliados utilizando o Teste Q de Dixon (Teste Q), no intuito de eliminar possíveis valores *outliers*, ou seja, valores discrepantes. O nível de confiança considerado foi o de 95%.

Posteriormente, são apresentados os resultados dos sinais de vibração, sendo que estes foram processados através de um algoritmo de sistema imunológico artificial de seleção negativa.

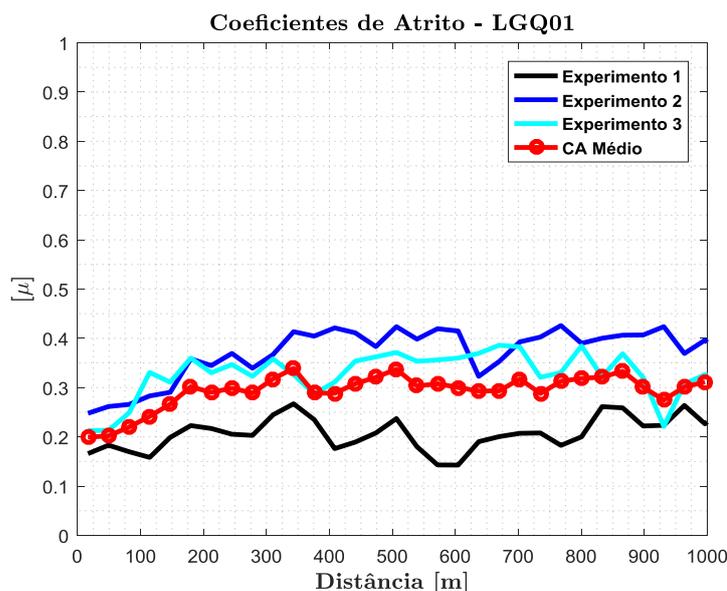
4.1 BIOLUBRIFICANTES

4.1.1 Biograxa LGQ01

Por meio do sistema de aquisição de dados e utilizando o *software* Octave para o processamento de sinais, obteve-se os gráficos de distância de deslizamento versus coeficientes de atrito, conforme ilustrado na Fig. 58.

Cabe destacar que é representado o nível RMS do sinal original. Para tal, o número total de pontos [N] foi dividido em pequenas janelas, sendo estas representadas por cada ponto, conforme expressado pela Eq. (16).

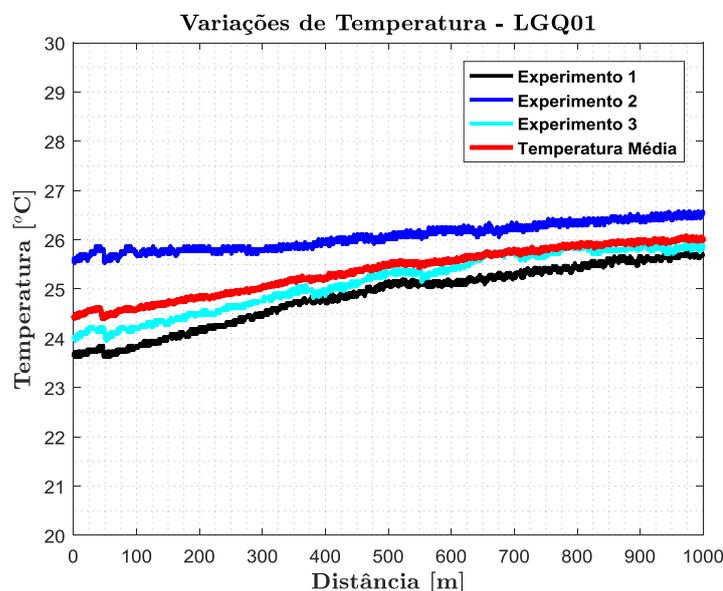
Figura 58 – Coeficientes de atrito da biograxa LGQ01



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Fig. 59 ilustra a variação de temperatura entre o pino e o disco pela distância de deslizamento.

Figura 59 – Temperaturas na superfície de contato utilizando a biograxa LGQ01



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Na Tab. 6 destacam-se as principais análises dos resultados obtidos nas Fig. 58 e 59.

Tabela 6 – Principais resultados de coeficiente de atrito e temperatura – LGQ01

Ensaio	Coeficientes de Atrito			Temperaturas		
	m_{\max}	m_{\min}	m_{med}	T_{\max} (°C)	T_{\min} (°C)	V_{tp} (°C)
1°	0,267	0,143	0,207	25,87	23,63	2,24
2°	0,429	0,248	0,371	26,61	25,53	1,08
3°	0,386	0,213	0,327	25,95	23,95	2,00
Média	0,339	0,199	0,293	26,08	24,39	1,69

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Para cada ensaio, foram determinados o coeficiente de atrito máximo (m_{\max}), mínimo (m_{\min}) e médio (m_{med}) durante toda a distância de deslizamento. Além disso, a mesma avaliação foi feita para a temperatura na superfície de contato, ou seja, temperatura máxima (T_{\max}), mínima (T_{\min}) e variação de temperatura (V_{tp}).

A Tab. 7 apresenta os valores de perdas de massa e volume, tanto para o pino quanto para o disco, para cada ensaio realizado. Ressalta-se que as perdas de volume (VL) foram calculadas através da Eq. (17).

Tabela 7 – Valores de perdas de massa e volume das amostras – LGQ01

Ensaio	Pino (SAE 1040)		Disco (SAE 1040)	
	ML (g)	VL (mm ³)	ML (g)	VL (mm ³)
1°	0,0001	1,27*E-2	0,0004	5,10*E-2
2°	0,0004	5,10*E-2	0,0004	5,10*E-2
3°	0,0001	1,27*E-2	0,0004	5,10*E-2
Média	0,0001	1,27*E-2	0,0004	5,10*E-2

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Através do Teste Q, os valores destacados em vermelho na Tab. 7 referem-se à valores discrepantes (*outliers*), e por isso foram rejeitados para os cálculos das médias.

Após a obtenção dos resultados de perdas de volume (VL), pode-se quantificar através das Eq. (5), (7) e (8), os valores de coeficiente de desgaste e taxas de desgaste para cada experimento, respectivamente. A Tab. 8 apresenta a quantificação de desgaste tanto para o pino como para o disco.

Tabela 8 – Coeficientes e taxas de desgaste – LGQ01

Ensaio	Pino (SAE 1040)			Disco (SAE 1040)		
	K	γ (mm ³ /s)	α (mm ³)	K	γ (mm ³ /s)	α (mm ³)
1°	8,99*E-7	1,12*E-6	1,27*E-2	35,99*E-7	4,48*E-6	5,10*E-2
2°	35,99*E-7	4,48*E-6	5,10*E-2	35,99*E-7	4,48*E-6	5,10*E-2
3°	8,99*E-7	1,12*E-6	1,27*E-2	35,99*E-7	4,48*E-6	5,10*E-2
Média	8,99*E-7	1,12*E-6	1,27*E-2	35,99*E-7	4,48*E-6	5,10*E-2

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Novamente, destaca-se que os valores em destaque significam que são discrepantes.

A Tab. 9 a seguir apresenta o índice PQ obtido através do PQA. Este índice foi determinado antes (Novo) e após (Utilizado) a realização do experimento. Foram realizadas 10 medições.

Tabela 9 – Índices PQ determinados através do PQA – LGQ01

ÍNDICE PQ		
Medições	Novo	Utilizado
1º	11	24
2º	9	23
3º	14	24
4º	14	24
5º	10	24
6º	14	24
7º	10	22
8º	15	26
9º	12	27
10º	14	24
Média	12,3	24,2

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Apesar da suspeita da existência de valores discrepantes, através do Teste Q de Dixon, nenhum valor do índice PQ da Tab. 9 foi rejeitado para o cálculo da média.

A Tab. 10 apresenta as concentrações dos elementos químicos presentes na biograxa obtidas a partir do espectrômetro de raios X. Já a Fig. 60, os espectros produzidos por estes elementos.

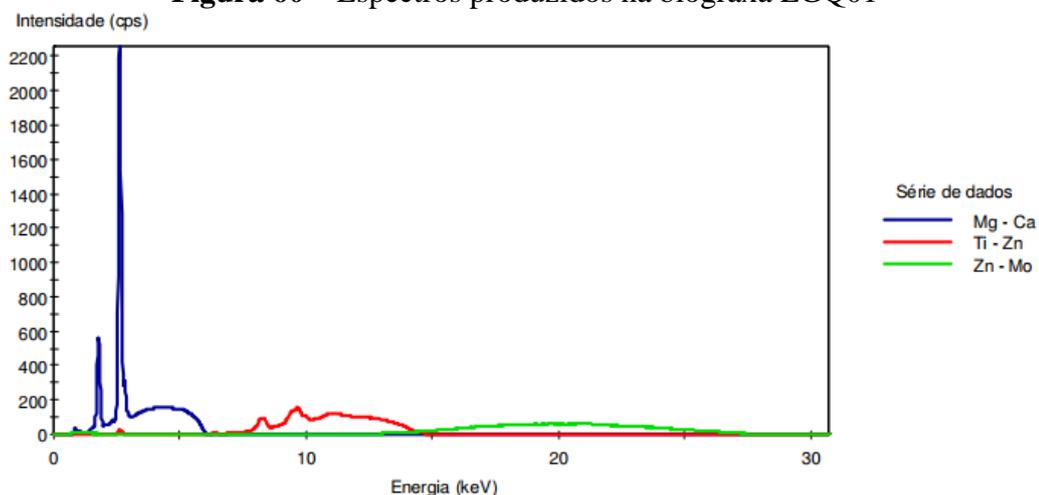
Tabela 10 – Concentrações dos elementos químicos – LGQ01

Elemento Químico	Símbolo	Concentração
Magnésio	Mg	162,2 (mg/kg)
Fósforo	P	0,0168 (Wt %)
Enxofre	S	0,0103 (Wt %)
Cloro	Cl	15.180 (mg/kg)
Cálcio	Ca	0 (Wt %)
Zinco	Zn	0,0013 (Wt %)
Ferro	Fe	32,4 (mg/kg)
Níquel	Ni	3,9 (mg/kg)
Cobalto	Co	0,5 (mg/kg)
Total		36,8 (mg/kg)

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Na Tab. 10 destacam-se três elementos químicos (Ferro, Níquel e Cobalto), pois estes representam os materiais ferromagnéticos presentes na amostra.

Figura 60 – Espectros produzidos na biograxa LGQ01



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Fig. 61 refere-se a natureza das partículas presentes na amostra, obtidas através do ferrosκόpio com uma ampliação de 100 vezes. Observa-se a presença de algumas partículas oxidadas, bem como uma partícula em forma de cavaco de coloração azulada, o que indica a ocorrência de um desgaste severo por deslizamento com aumento de temperatura.

Figura 61 – Partículas obtidas da biograxa LGQ01

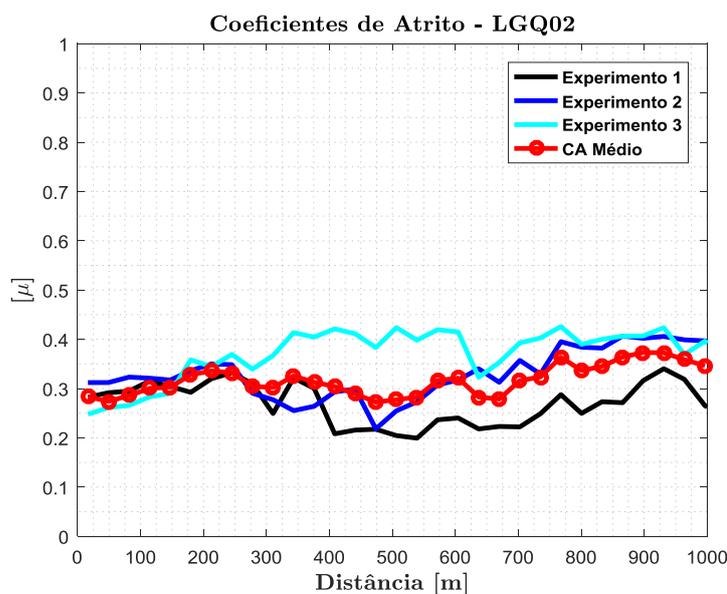


Fonte: Elaboração do próprio autor.

4.1.2 Biograxa LGQ02

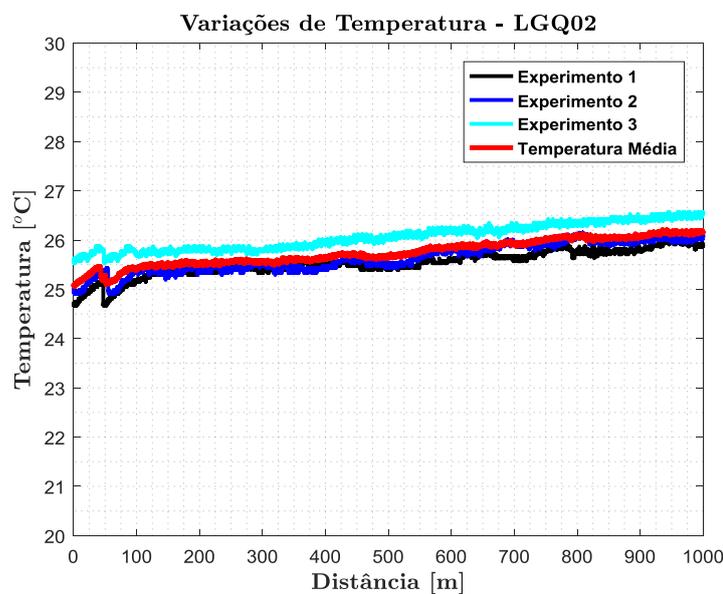
As Fig. 62 e 63, ilustram, respectivamente, os coeficientes de atrito e as variações de temperatura entre o pino e o disco determinadas nos ensaios com a biograxa LGQ02.

Figura 62 – Coeficientes de atrito da biograxa LGQ02



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 63 – Temperaturas na superfície de contato utilizando a biograxa LGQ02



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Na Tab. 11 a seguir destacam-se as principais análises dos resultados obtidos nas Fig. 62 e 63. Já os valores de perdas de massa e volume estão representados na Tab. 12.

Tabela 11 – Principais resultados de coeficiente de atrito e temperatura – LGQ02

Ensaio	Coeficientes de Atrito			Temperaturas		
	m_{\max}	m_{\min}	m_{med}	T_{\max} (°C)	T_{\min} (°C)	V_{tp} (°C)
1°	0,340	0,199	0,269	26,05	24,67	1,38
2°	0,407	0,218	0,330	26,15	24,91	1,24
3°	0,425	0,247	0,370	26,60	25,54	1,06
Média	0,373	0,272	0,316	26,23	25,05	1,18

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 12 – Valores de perdas de massa e volume das amostras – LGQ02

Ensaio	Pino (SAE 1040)		Disco (SAE 1040)	
	ML (g)	VL (mm ³)	ML (g)	VL (mm ³)
1°	0,0002	2,55*E-2	0,0002	2,55*E-2
2°	0,0003	3,82*E-2	0,0003	3,82*E-2
3°	0,0003	3,82*E-2	0,0002	2,55*E-2
Média	0,00027	3,39*E-2	0,00023	2,97*E-2

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Através das Eq. (5), (7) e (8), os valores de coeficiente de desgaste e taxas de desgaste foram determinados para cada experimento, sendo que esta quantificação está representada na Tab. 13.

Tabela 13 – Coeficientes e taxas de desgaste – LGQ02

Ensaio	Pino (SAE 1040)			Disco (SAE 1040)		
	K	γ (mm ³ /s)	ϱ (mm ³)	K	γ (mm ³ /s)	ϱ (mm ³)
1°	17,99*E-7	2,24*E-6	2,55*E-2	17,99*E-7	2,24*E-6	2,55*E-2
2°	26,99*E-7	3,36*E-6	3,82*E-2	26,99*E-7	3,36*E-6	3,82*E-2
3°	26,99*E-7	3,36*E-6	3,82*E-2	17,99*E-7	2,24*E-6	2,55*E-2
Média	23,99*E-7	2,98*E-6	3,39*E-2	20,99*E-7	2,61*E-6	2,97*E-2

Fonte: Elaboração do próprio autor.

O índice PQ obtido através do PQA está representado na Tab. 14 a seguir.

Tabela 14 – Índices PQ determinados através do PQA – LGQ02

ÍNDICE PQ		
Medições	Novo	Utilizado
1º	9	33
2º	12	33
3º	11	32
4º	10	32
5º	13	34
6º	10	33
7º	9	33
8º	11	34
9º	10	33
10º	12	33
Média	10,7	33

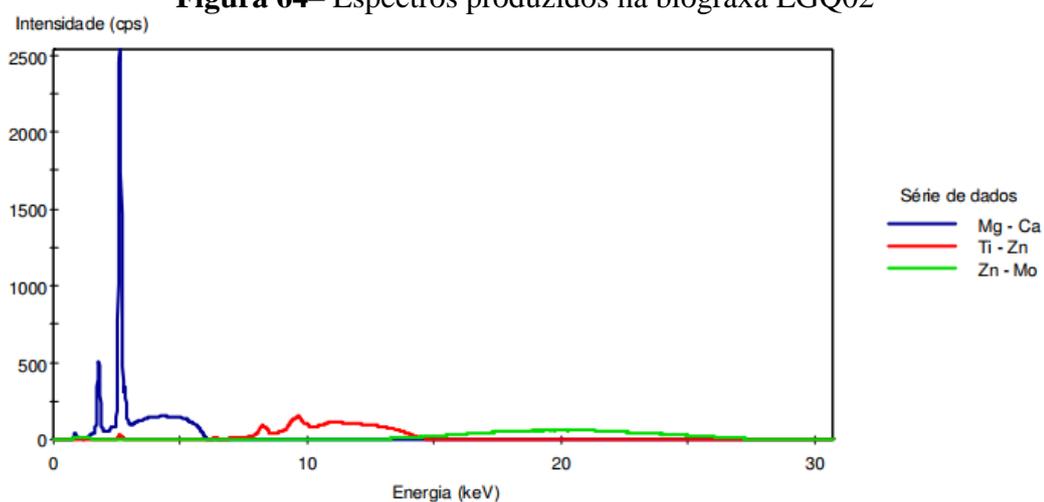
Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Tab. 15 apresenta as concentrações dos elementos químicos presentes na biograxa LGQ02, enquanto que a Fig. 64 ilustra os espectros produzidos por estes elementos.

Tabela 15 – Concentrações dos elementos químicos – LGQ02

Elemento Químico	Símbolo	Concentração
Magnésio	Mg	162,3 (mg/kg)
Fósforo	P	0,0131 (Wt %)
Enxofre	S	0,0130 (Wt %)
Cloro	Cl	17.646 (mg/kg)
Cálcio	Ca	0 (Wt %)
Zinco	Zn	0,0010 (Wt %)
Ferro	Fe	37,9 (mg/kg)
Níquel	Ni	1,4 (mg/kg)
Cobalto	Co	0 (mg/kg)
Total		39,3 (mg/kg)

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 64– Espectros produzidos na biograxa LGQ02

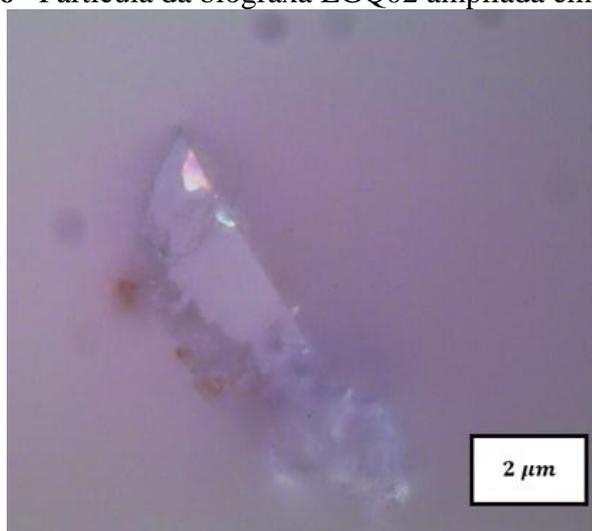
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Através do ferrocópio, obteve-se as Fig. 65 e 66. A Fig. 65 foi tirada com uma ampliação de 100 vezes, e nela destaca-se uma partícula. Esta foi ampliada com uma lente de aumento em 500 vezes, como observa-se na Fig. 66.

Figura 65 – Partículas obtidas da biograxa LGQ02

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 66– Partícula da biograxa LGQ02 ampliada em 500 vezes



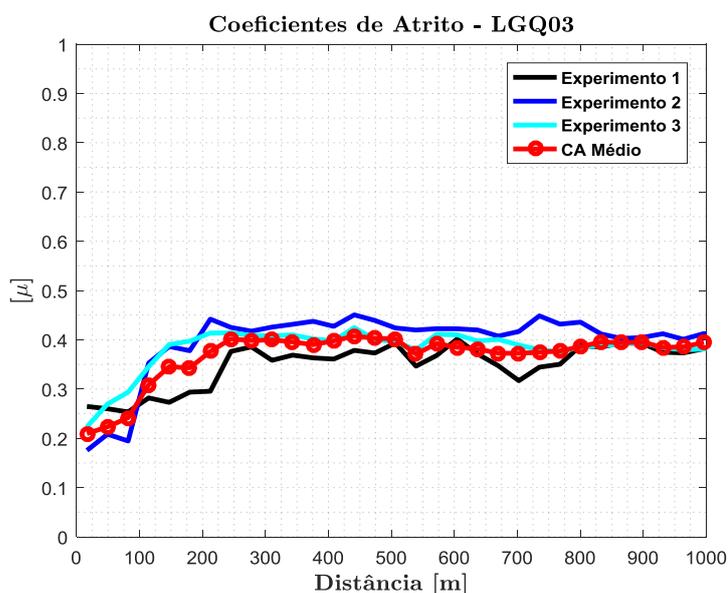
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Através das imagens, observa-se a presença de várias partículas oxidadas e uma partícula estriada que está relacionada à um desgaste severo por deslizamento.

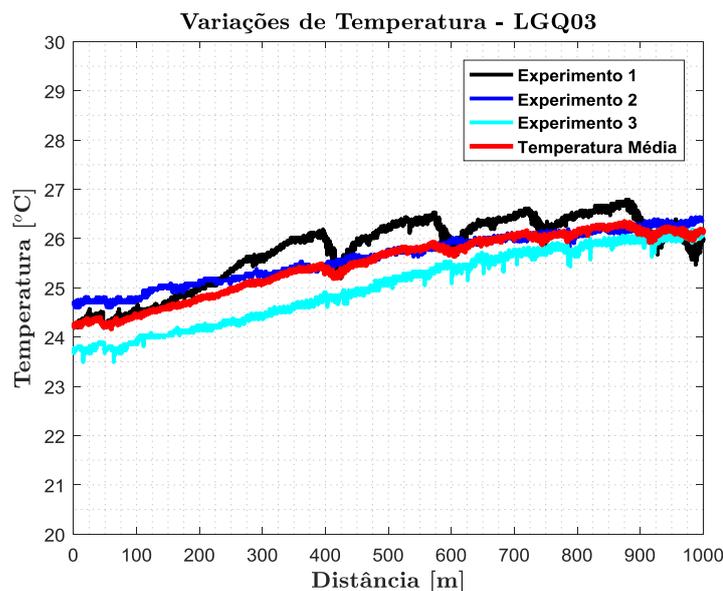
4.1.3 Biograxa LGQ03

Os gráficos de distância de deslizamento versus coeficiente de atrito e variação de temperatura entre o pino e o disco determinados para a biograxa LGQ03 estão ilustrados nas Fig. 67 e 68 a seguir. Já as principais análises destes resultados destacam-se na Tab. 16.

Figura 67 – Coeficientes de atrito da biograxa LGQ03



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 68 – Temperaturas na superfície de contato utilizando a biograxa LGQ03**Tabela 16** – Principais resultados de coeficiente de atrito e temperatura – LGQ03

Ensaio	Coeficientes de Atrito			Temperaturas		
	m_{\max}	m_{\min}	m_{med}	T_{\max} (°C)	T_{\min} (°C)	V_{tp} (°C)
1°	0,406	0,254	0,351	26,79	24,19	2,60
2°	0,451	0,176	0,397	26,47	24,61	1,86
3°	0,425	0,224	0,382	26,29	23,49	2,80
Média	0,408	0,210	0,368	26,35	24,16	2,19

Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Tab. 17 apresenta os valores de perdas de massa e volume para cada ensaio realizado. Já a Tab. 18 contém a quantificação de desgaste tanto para o pino como para o disco.

Tabela 17 – Valores de perdas de massa e volume das amostras – LGQ03

Ensaio	Pino (SAE 1040)		Disco (SAE 1040)	
	ML (g)	VL (mm ³)	ML (g)	VL (mm ³)
1°	0,0012	15,3*E-2	0,0009	11,5*E-2
2°	0,0016	20,4*E-2	0,0011	14,0*E-2
3°	0,0009	11,5*E-2	0,0005	6,37*E-2
Média	0,00123	15,7*E-2	0,00083	10,6*E-2

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 18 – Coeficientes e taxas de desgaste – LGQ03

Ensaio	Pino (SAE 1040)			Disco (SAE 1040)		
	K	γ (mm ³ /s)	α (mm ³)	K	γ (mm ³ /s)	α (mm ³)
1°	10,79*E-6	13,45*E-6	15,3*E-2	8,1*E-6	10,1*E-6	11,5*E-2
2°	14,39*E-6	17,94*E-6	20,4*E-2	9,89*E-6	12,33*E-6	14,0*E-2
3°	8,1*E-6	10,1*E-6	11,5*E-2	4,49*E-6	5,61*E-6	6,37*E-2
Média	11,1*E-6	13,83*E-6	15,7*E-2	7,49*E-6	9,35*E-6	10,6*E-2

Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Tab. 19 apresenta o índice PQ obtido através do PQA. A Tab. 20 a seguir, destaca as concentrações dos elementos químicos presentes na biograxa, enquanto que os espectros produzidos por estes elementos estão ilustrados na Fig. 69.

Tabela 19 – Índices PQ determinados através do PQA – LGQ03

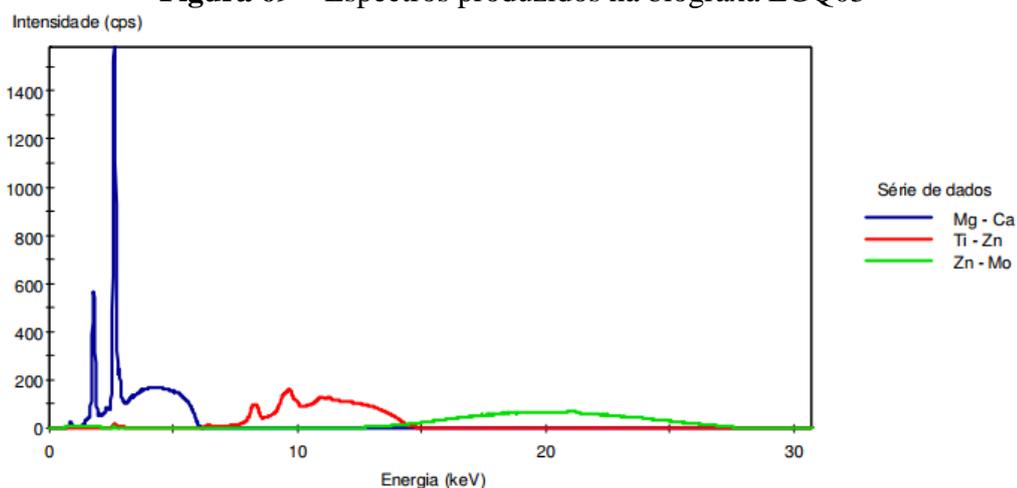
ÍNDICE PQ		
Medições	Novo	Utilizado
1°	15	37
2°	13	39
3°	12	37
4°	14	38
5°	12	38
6°	13	38
7°	12	40
8°	14	38
9°	12	38
10°	13	38
Média	13	38,1

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 20 – Concentrações dos elementos químicos – LGQ03

Elemento Químico	Símbolo	Concentração
Magnésio	Mg	119 (mg/kg)
Fósforo	P	0,0179 (Wt %)
Enxofre	S	0,0145 (Wt %)
Cloro	Cl	9.720,4 (mg/kg)
Cálcio	Ca	0,0013 (Wt %)
Zinco	Zn	0,0012 (Wt %)
Ferro	Fe	62,8 (mg/kg)
Níquel	Ni	5,6 (mg/kg)
Cobalto	Co	2,9 (mg/kg)
Total		71,3 (mg/kg)

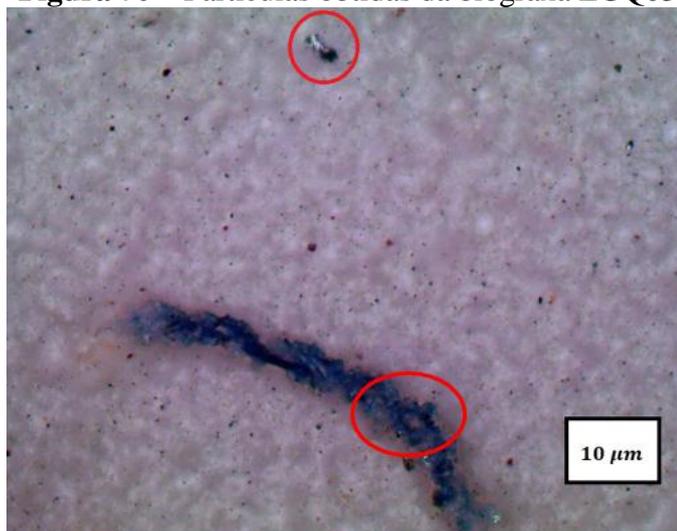
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 69 – Espectros produzidos na biograxa LGQ03

Fonte: Elaboração do próprio autor.

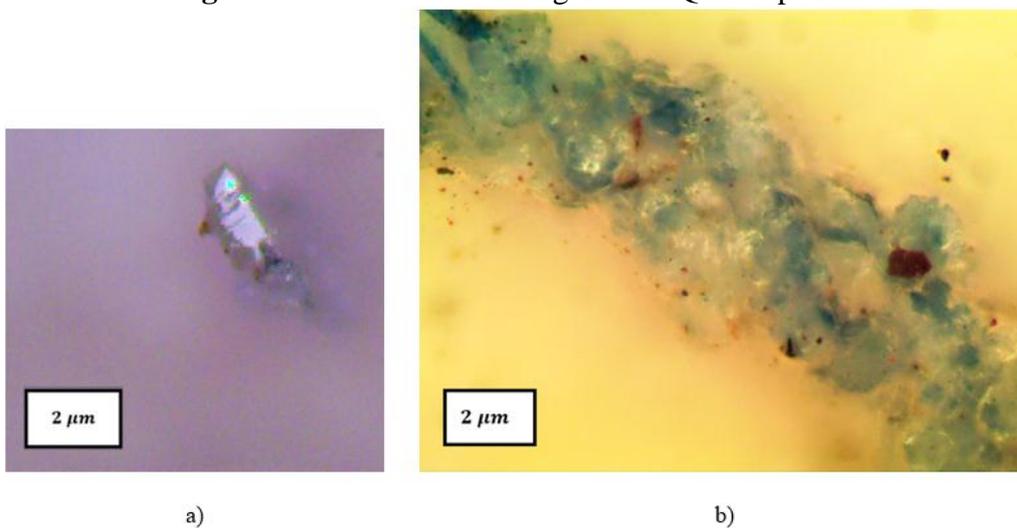
As Fig. 70 e 71 a seguir representam a natureza das partículas presentes na biograxa LGQ03. A Fig. 70 foi obtida com uma lente de aumento em 100 vezes e pode-se observar nela, com destaque na Fig. 71a, uma partícula estriada, e na Fig. 71b, um aglomerado de partículas de coloração azulada, ambas indicativas de desgaste severo.

Figura 70 – Partículas obtidas da biograxa LGQ03



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 71 – Partículas da biograxa LGQ03 ampliadas em 500 vezes



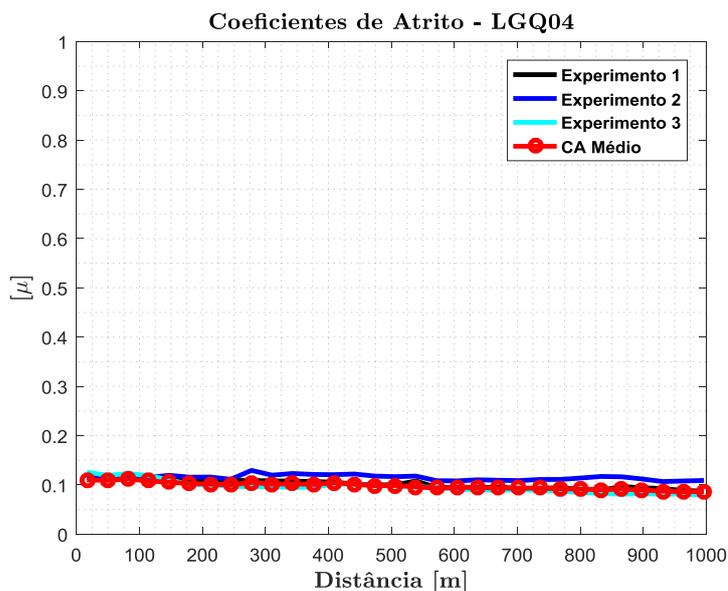
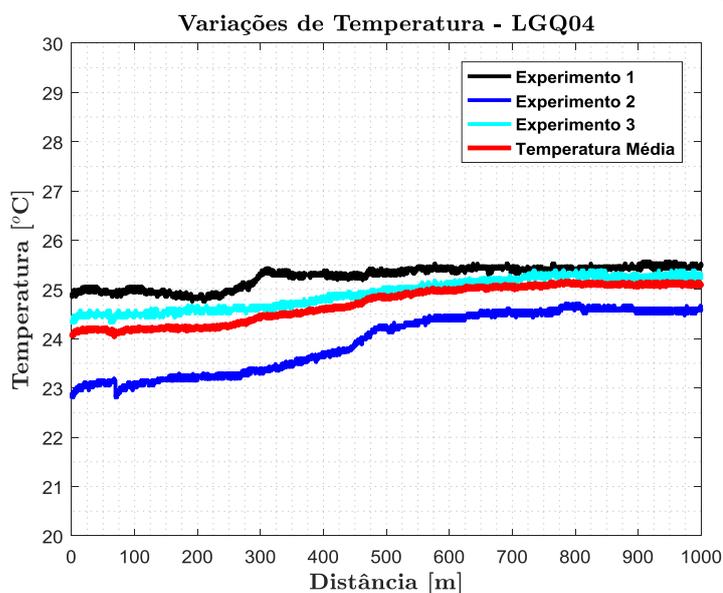
a)

b)

Fonte: Elaboração do próprio autor.

4.1.4 Biograxa LGQ04

As Fig. 72 e 73 a seguir, ilustram, respectivamente, os coeficientes de atrito e as variações de temperatura entre o pino e o disco determinadas nos ensaios com a biograxa LGQ04. As principais análises dos resultados obtidos nas Fig. 72 e 73 estão representadas na Tab. 21.

Figura 72 – Coeficientes de atrito da biograxa LGQ04**Figura 73** – Temperaturas na superfície de contato utilizando a biograxa LGQ04**Tabela 21** – Principais resultados de coeficiente de atrito e temperatura – LGQ04

Ensaio	Coeficientes de Atrito			Temperaturas		
	m_{\max}	m_{\min}	m_{med}	T_{\max} (°C)	T_{\min} (°C)	V_{tp} (°C)
1°	0,115	0,087	0,101	25,57	24,75	0,82
2°	0,129	0,107	0,115	24,68	22,85	1,83
3°	0,126	0,079	0,098	25,44	24,30	1,14
Média	0,112	0,086	0,098	25,17	24,04	1,13

Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Tab. 22 apresenta os valores de perdas de massa e volume, tanto para o pino quanto para o disco, para cada ensaio realizado. Já a Tab. 23 apresenta a quantificação de desgaste obtida através das Eq. (5), (7) e (8).

Tabela 22 – Valores de perdas de massa e volume das amostras – LGQ04

Ensaio	Pino (SAE 1040)		Disco (SAE 1040)	
	ML (g)	VL (mm ³)	ML (g)	VL (mm ³)
1°	0,0004	5,10*E-2	0,0002	2,55*E-2
2°	0,0005	6,37*E-2	0,0004	5,10*E-2
3°	0,0002	2,55*E-2	0,0002	2,55*E-2
Média	0,00037	4,67*E-2	0,0002	2,55*E-2

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 23 – Coeficientes e taxas de desgaste – LGQ04

Ensaio	Pino (SAE 1040)			Disco (SAE 1040)		
	K	γ (mm ³ /s)	α (mm ³)	K	γ (mm ³ /s)	α (mm ³)
1°	3,59*E-6	4,48*E-6	5,10*E-2	17,99*E-6	2,24*E-6	2,55*E-2
2°	4,49*E-6	5,61*E-6	6,37*E-2	35,99*E-7	4,48*E-6	5,10*E-2
3°	17,99*E-6	2,24*E-6	2,55*E-2	17,99*E-6	2,24*E-6	2,55*E-2
Média	8,69*E-6	4,11*E-6	4,67*E-2	17,99*E-6	2,24*E-6	2,55*E-2

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Através do Teste Q, os valores destacados em vermelho nas tabelas anteriores referem-se à valores discrepantes (*outliers*), e por isso foram rejeitados para os cálculos das médias.

O índice PQ obtido através do PQA destaca-se na Tab. 24, enquanto que as concentrações dos elementos químicos presentes na biograxa LGQ04 estão ilustradas na Tab. 25. Os espectros produzidos por estes elementos estão representados na Fig. 74 a seguir.

Tabela 24 – Índices PQ determinados através do PQA – LGQ04

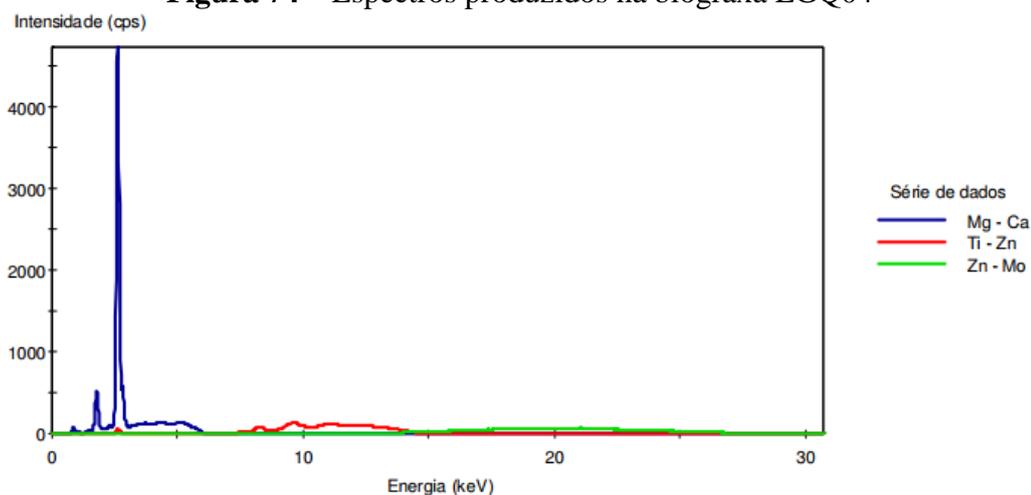
ÍNDICE PQ		
Medições	Novo	Utilizado
1º	5	10
2º	4	8
3º	7	7
4º	4	11
5º	9	9
6º	7	10
7º	5	8
8º	8	10
9º	7	9
10º	4	9
Média	6	9,1

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 25 – Concentrações dos elementos químicos – LGQ04

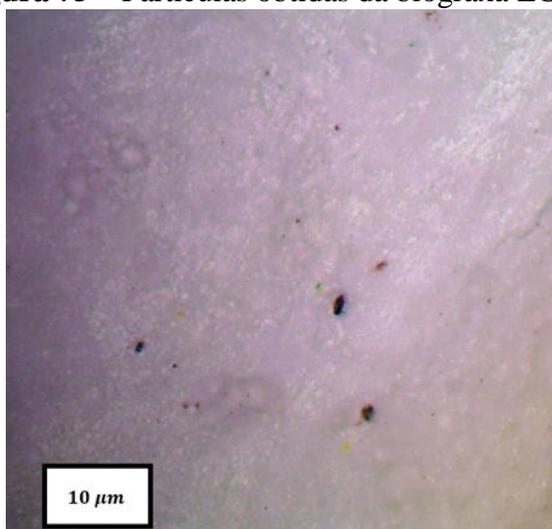
Elemento Químico	Símbolo	Concentração
Magnésio	Mg	0 (mg/kg)
Fósforo	P	0,0226 (Wt %)
Enxofre	S	0,0241 (Wt %)
Cloro	Cl	42.043,3 (mg/kg)
Cálcio	Ca	0 (Wt %)
Zinco	Zn	0,0001 (Wt %)
Ferro	Fe	14,4 (mg/kg)
Níquel	Ni	0 (mg/kg)
Cobalto	Co	0 (mg/kg)
Total		14,4 (mg/kg)

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 74 – Espectros produzidos na biograxa LGQ04

Fonte: Elaboração do próprio autor.

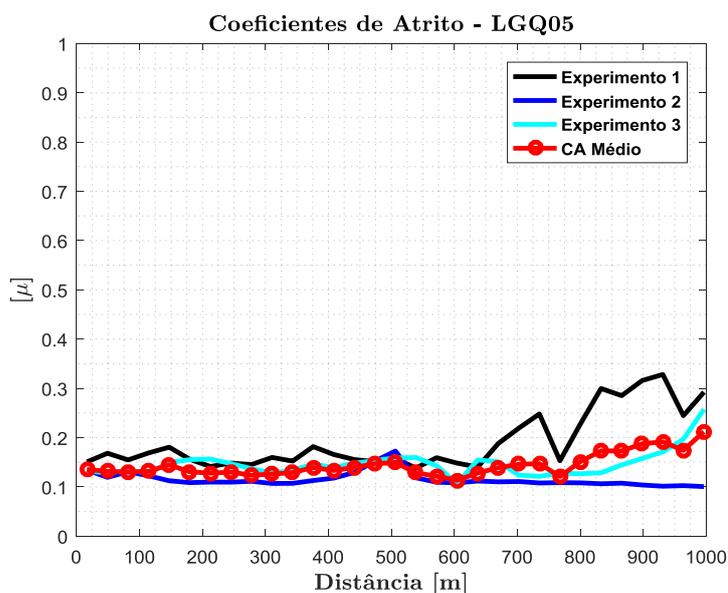
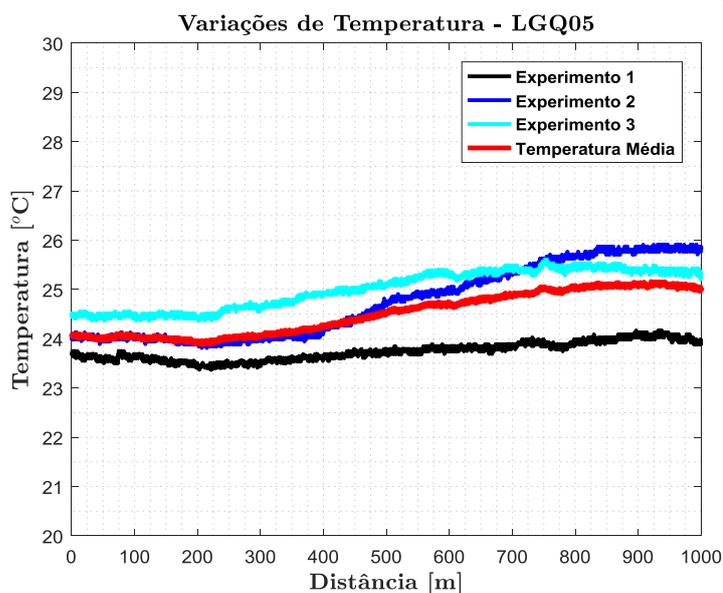
Através do ferrocópio obteve-se a Fig. 75. Observa-se que há pouquíssimas partículas, todas indicativas de desgaste normal por atrito.

Figura 75 – Partículas obtidas da biograxa LGQ04

Fonte: Elaboração do próprio autor.

4.1.5 Biograxa LGQ05

Os gráficos de distância de deslizamento versus coeficiente de atrito e variação de temperatura entre o pino e o disco determinados para a biograxa LGQ05 estão ilustrados nas Fig. 76 e 77 a seguir. Já as principais análises destes resultados destacam-se na Tab. 26.

Figura 76 – Coeficientes de atrito da biograxa LGQ05**Figura 77** – Temperaturas na superfície de contato utilizando a biograxa LGQ05**Tabela 26** – Principais resultados de coeficiente de atrito e temperatura – LGQ05

Ensaio	Coeficientes de Atrito			Temperaturas		
	m_{max}	m_{min}	m_{med}	T_{max} (°C)	T_{min} (°C)	V_{tp} (°C)
1°	0,328	0,138	0,191	24,17	23,37	0,80
2°	0,173	0,101	0,115	25,91	23,81	2,10
3°	0,257	0,106	0,147	25,61	24,37	1,24
Média	0,212	0,113	0,144	25,16	23,88	1,28

Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Tab. 27 apresenta os valores de perdas de massa e volume para cada ensaio realizado. Já a Tab. 28 contém a quantificação de desgaste tanto para o pino como para o disco.

Tabela 27 – Valores de perdas de massa e volume das amostras – LGQ05

Ensaio	Pino (SAE 1040)		Disco (SAE 1040)	
	ML (g)	VL (mm ³)	ML (g)	VL (mm ³)
1°	0,0002	2,55*E-2	0,0001	1,27*E-2
2°	0,0001	1,27*E-2	0,0003	3,82*E-2
3°	0,0002	2,55*E-2	0,0001	1,27*E-2
Média	0,00017	2,13*E-2	0,0001	1,27*E-2

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 28 – Coeficientes e taxas de desgaste – LGQ05

Ensaio	Pino (SAE 1040)			Disco (SAE 1040)		
	K	γ (mm ³ /s)	α (mm ³)	K	γ (mm ³ /s)	α (mm ³)
1°	17,99*E-7	2,24*E-6	2,55*E-2	8,99*E-7	1,12*E-6	1,27*E-2
2°	8,99*E-7	1,12*E-6	1,27*E-2	26,99*E-7	3,36*E-6	3,82*E-2
3°	17,99*E-7	2,24*E-6	2,55*E-2	8,99*E-7	1,12*E-6	1,27*E-2
Média	14,99*E-7	1,87*E-6	2,13*E-2	8,99*E-7	1,12*E-6	1,27*E-2

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Vale ressaltar que os valores em destaque significam que são discrepantes.

O índice PQ obtido através do PQA destaca-se na Tab. 29 a seguir, enquanto que as concentrações dos elementos químicos presentes na biograxa LGQ05 estão ilustradas na Tab. 30. Os espectros produzidos por estes elementos estão representados na Fig. 78.

Tabela 29 – Índices PQ determinados através do PQA – LGQ05

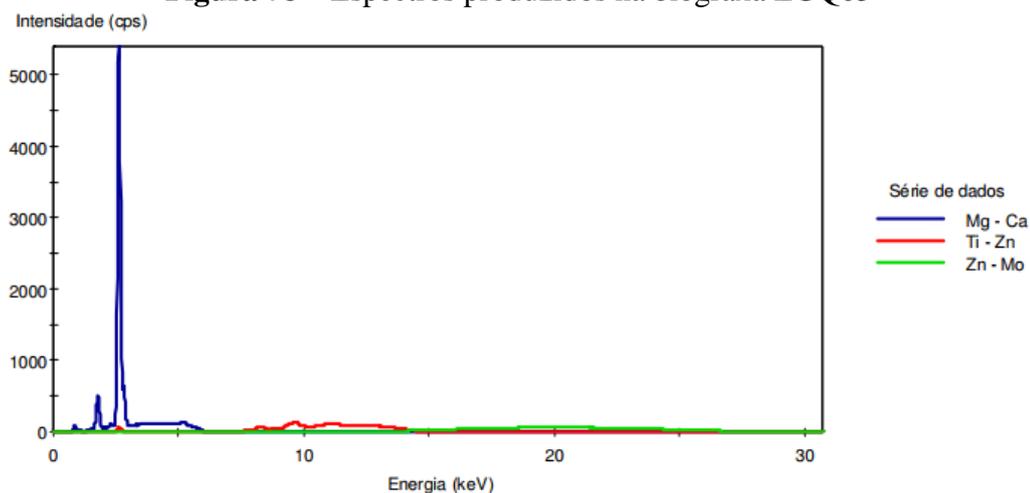
ÍNDICE PQ		
Medições	Novo	Utilizado
1º	14	12
2º	11	16
3º	15	15
4º	12	14
5º	12	14
6º	12	16
7º	12	12
8º	11	13
9º	12	14
10º	14	14
Média	12,5	14

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 30 – Concentrações dos elementos químicos – LGQ05

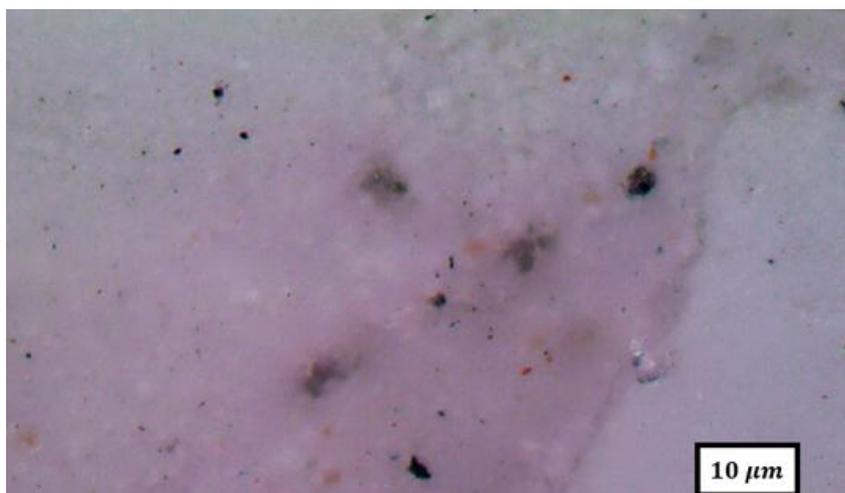
Elemento Químico	Símbolo	Concentração
Magnésio	Mg	0 (mg/kg)
Fósforo	P	0,0151 (Wt %)
Enxofre	S	0,0340 (Wt %)
Cloro	Cl	50.925,3 (mg/kg)
Cálcio	Ca	0 (Wt %)
Zinco	Zn	0 (Wt %)
Ferro	Fe	8.5 (mg/kg)
Níquel	Ni	0 (mg/kg)
Cobalto	Co	0 (mg/kg)
Total		8,5 (mg/kg)

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 78 – Espectros produzidos na biograxa LGQ05

Fonte: Elaboração do próprio autor.

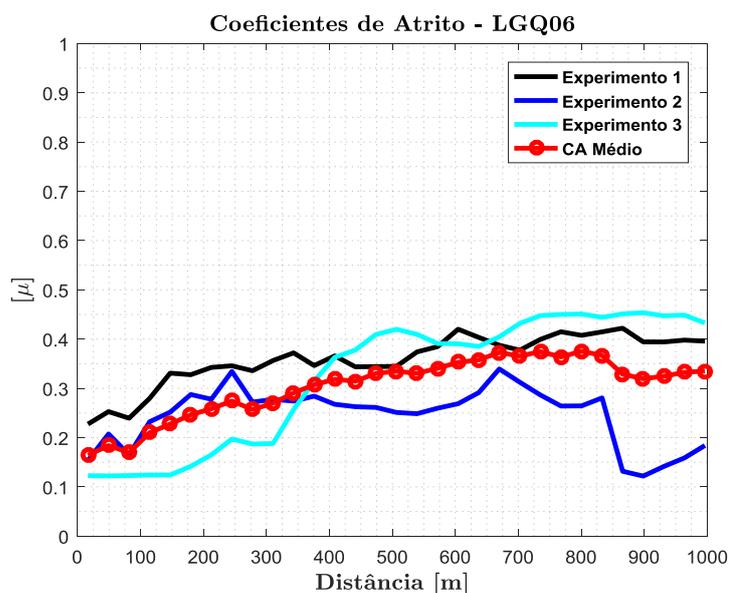
Observa-se na Fig. 79, obtida através do ferrosκόpio, algumas partículas, no entanto todas apresentam características indicativas de desgaste normal por atrito.

Figura 79 – Partículas obtidas da biograxa LGQ05

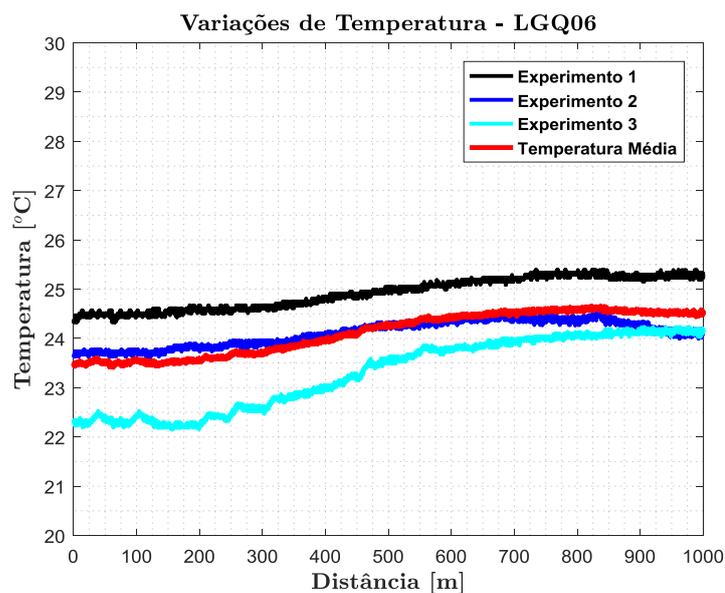
Fonte: Elaboração do próprio autor.

4.1.6 Biograxa LGQ06

As Fig. 80 e 81 a seguir, ilustram, respectivamente, os coeficientes de atrito e as variações de temperatura entre o pino e o disco determinadas nos ensaios com a biograxa LGQ06.

Figura 80 – Coeficientes de atrito da biograxa LGQ06

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 81 – Temperaturas na superfície de contato utilizando a biograxa LGQ06

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Na Tab. 31 a seguir destacam-se as principais análises de resultados obtidos nas figuras anteriores. Além disso, nas Tab. 32 e 33 apresentam-se, respectivamente, os valores de perdas de massa e volume e a quantificação de desgaste para cada ensaio realizado.

Tabela 31 – Principais resultados de coeficiente de atrito e temperatura – LGQ06

Ensaio	Coeficientes de Atrito			Temperaturas		
	m_{\max}	m_{\min}	m_{med}	T_{\max} (°C)	T_{\min} (°C)	V_{tp} (°C)
1°	0,422	0,227	0,359	25,39	24,33	1,06
2°	0,339	0,122	0,246	24,57	23,63	0,94
3°	0,454	0,122	0,325	24,23	22,15	2,08
Média	0,375	0,164	0,303	24,65	23,41	1,24

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 32 – Valores de perdas de massa e volume das amostras – LGQ06

Ensaio	Pino (SAE 1040)		Disco (SAE 1040)	
	ML (g)	VL (mm ³)	ML (g)	VL (mm ³)
1°	0,0003	3,82*E-2	0,0002	2,55*E-2
2°	0,0001	1,27*E-2	0,0001	1,27*E-2
3°	0,0003	3,82*E-2	0,0001	1,27*E-2
Média	0,0003	3,82*E-2	0,00013	1,69*E-2

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 33 – Coeficientes e taxas de desgaste – LGQ06

Ensaio	Pino (SAE 1040)			Disco (SAE 1040)		
	K	γ (mm ³ /s)	α (mm ³)	K	γ (mm ³ /s)	α (mm ³)
1°	26,99*E-7	3,36*E-6	3,82*E-2	17,99*E-7	2,24*E-6	2,55*E-2
2°	8,99*E-7	1,12*E-6	1,27*E-2	8,99*E-7	1,12*E-6	1,27*E-2
3°	26,99*E-7	3,36*E-6	3,82*E-2	8,99*E-7	1,12*E-6	1,27*E-2
Média	26,99*E-7	3,36*E-6	3,82*E-2	11,99*E-7	1,49*E-6	1,69*E-2

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Destaca-se que os valores em vermelho representam resultados discrepantes.

O índice PQ obtido através do PQA destaca-se na Tab. 34 a seguir, enquanto que as concentrações dos elementos químicos estão ilustradas na Tab. 35. Os espectros produzidos por estes elementos estão representados na Fig. 82.

Tabela 34 – Índices PQ determinados através do PQA – LGQ06

ÍNDICE PQ		
Medições	Novo	Utilizado
1º	7	31
2º	9	32
3º	7	30
4º	9	31
5º	12	30
6º	9	31
7º	9	31
8º	10	33
9º	10	33
10º	9	34
Média	9,1	31,6

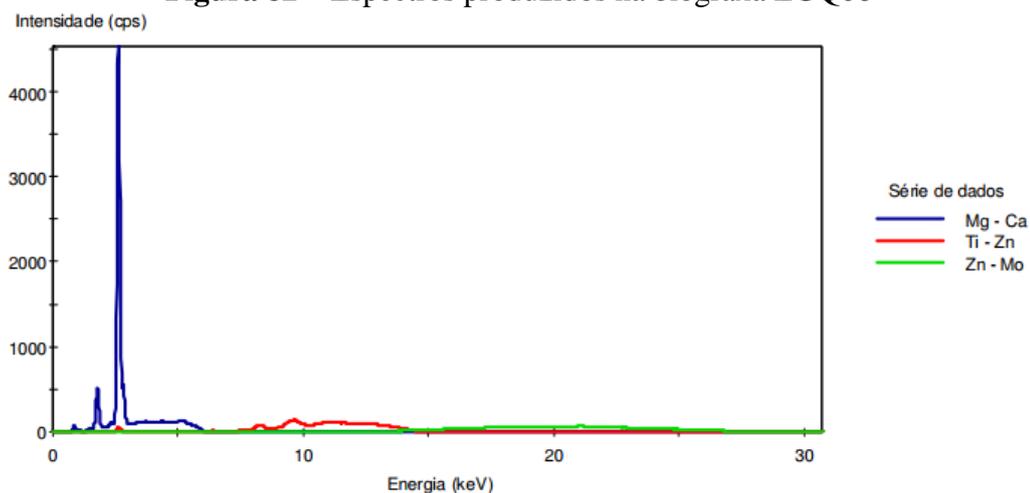
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 35 – Concentrações dos elementos químicos – LGQ06

Elemento Químico	Símbolo	Concentração
Magnésio	Mg	0 (mg/kg)
Fósforo	P	0,0141 (Wt %)
Enxofre	S	0,0303 (Wt %)
Cloro	Cl	39.245,7 (mg/kg)
Cálcio	Ca	0 (Wt %)
Zinco	Zn	0 (Wt %)
Ferro	Fe	38,1 (mg/kg)
Níquel	Ni	0 (mg/kg)
Cobalto	Co	0 (mg/kg)
Total		38,1 (mg/kg)

Fonte: Elaboração do próprio autor.

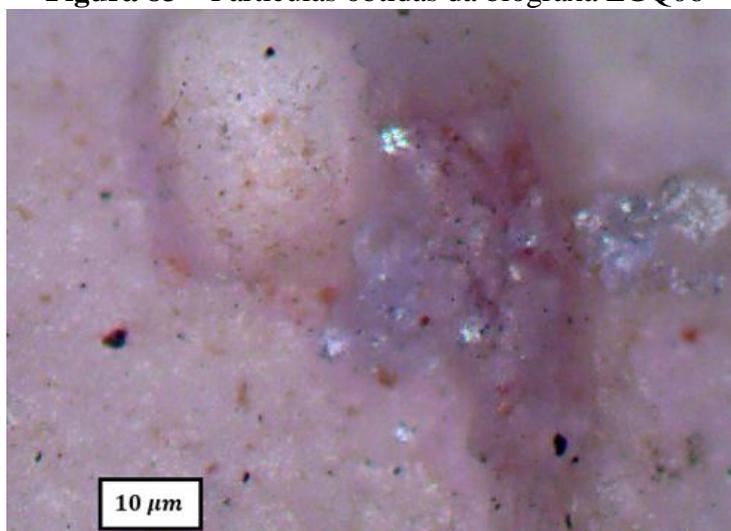
Figura 82 – Espectros produzidos na biograxa LGQ06



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Fig. 83 foi obtida através do ferrosκόpio e representa as partículas presentes na biograxa. Observa-se uma grande quantidade de partículas oxidadas, bem como partículas prateadas-azuladas, o que podem indicar a ocorrência de um desgaste severo por deslizamento.

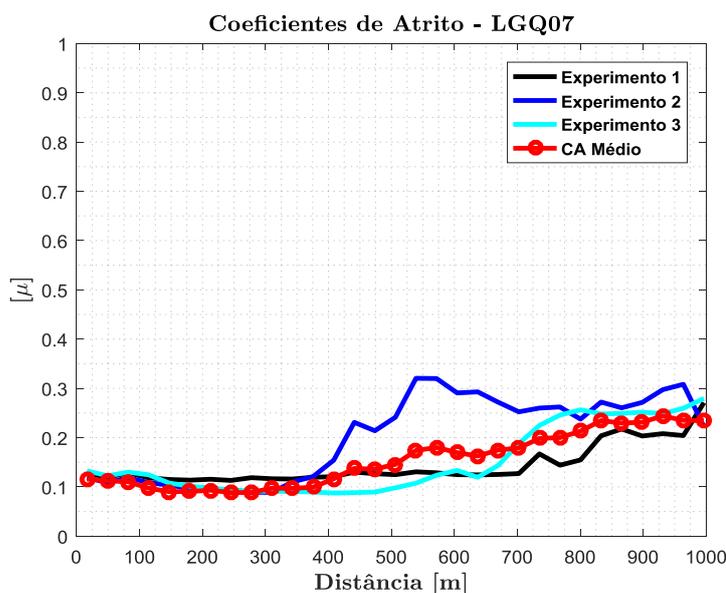
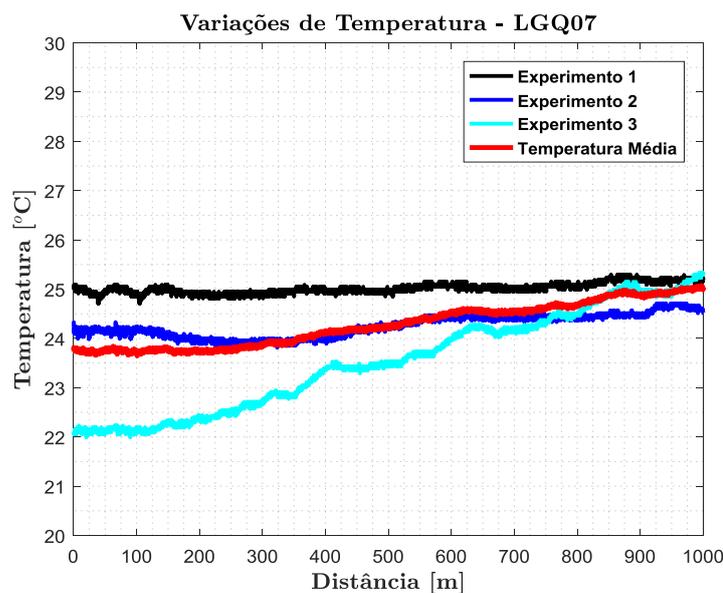
Figura 83 – Partículas obtidas da biograxa LGQ06



Fonte: Elaboração do próprio autor.

4.1.7 Biograxa LGQ07

Os gráficos de distância de deslizamento versus coeficiente de atrito e variação de temperatura entre o pino e o disco determinados para a biograxa LGQ07 estão ilustrados nas Fig. 84 e 85 a seguir. Já as principais análises destes resultados destacam-se na Tab. 36.

Figura 84 – Coeficientes de atrito da biograxa LGQ07**Figura 85** – Temperaturas na superfície de contato utilizando a biograxa LGQ07**Tabela 36** – Principais resultados de coeficiente de atrito e temperatura – LGQ07

Ensaio	Coeficientes de Atrito			Temperaturas		
	m_{\max}	m_{\min}	m_{med}	T_{\max} (°C)	T_{\min} (°C)	V_{tp} (°C)
1°	0,271	0,113	0,144	25,39	24,71	0,68
2°	0,320	0,089	0,201	24,71	23,81	0,90
3°	0,279	0,087	0,152	25,43	21,99	3,44
Média	0,244	0,088	0,154	25,07	23,64	1,43

Fonte: Elaboração do próprio autor.

As Tab. 37 e 38 apresentam, respectivamente, os valores de perdas de massa e volume e a quantificação de desgaste para cada ensaio realizado.

Tabela 37 – Valores de perdas de massa e volume das amostras – LGQ07

Ensaio	Pino (SAE 1040)		Disco (SAE 1040)	
	ML (g)	VL (mm ³)	ML (g)	VL (mm ³)
1°	0,0002	2,55*E-2	0,0003	3,82*E-2
2°	0,0002	2,55*E-2	0,0001	1,27*E-2
3°	0,0001	1,27*E-2	0,0002	2,55*E-2
Média	0,00017	2,13*E-2	0,0002	2,55*E-2

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 38 – Coeficientes e taxas de desgaste – LGQ07

Ensaio	Pino (SAE 1040)			Disco (SAE 1040)		
	K	γ (mm ³ /s)	φ (mm ³)	K	γ (mm ³ /s)	φ (mm ³)
1°	17,99*E-7	2,24*E-6	2,55*E-2	26,99*E-7	3,36*E-6	3,82*E-2
2°	17,99*E-7	2,24*E-6	2,55*E-2	8,99*E-7	1,12*E-6	1,27*E-2
3°	8,99*E-7	1,12*E-6	1,27*E-2	17,99*E-7	2,24*E-6	2,55*E-2
Média	14,99*E-7	1,87*E-6	2,13*E-2	17,99*E-7	2,24*E-6	2,55*E-2

Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Tab. 39 a seguir apresenta o índice PQ obtido através do PQA.

Tabela 39 – Índices PQ determinados através do PQA – LGQ07

Medições	Índice PQ	
	Novo	Utilizado
1º	24	26
2º	21	24
3º	24	27
4º	21	24
5º	22	22
6º	21	23
7º	22	24
8º	21	24
9º	21	24
10º	20	25
Média	21,7	24,3

Fonte: Elaboração do próprio autor.

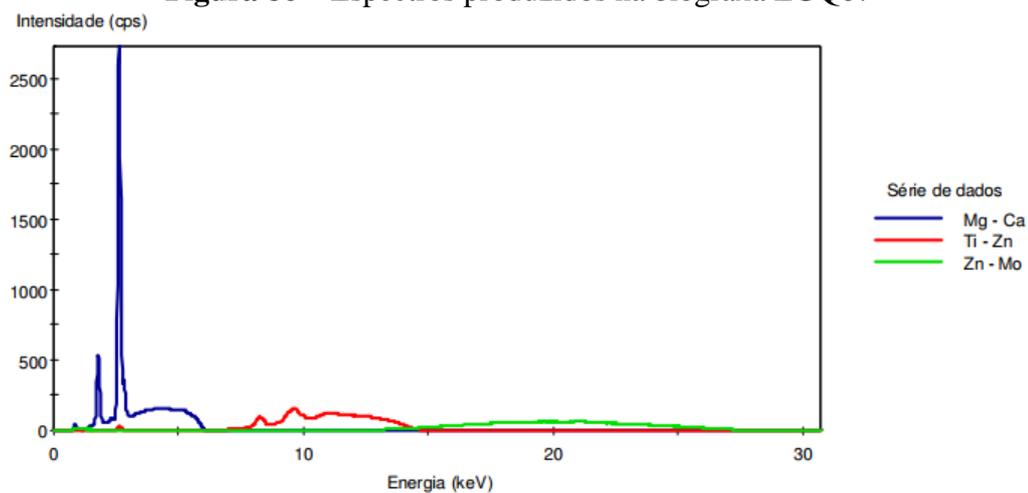
A análise dos dados da Tab. 39 indicou a presença de um valor suspeito (24 na coluna “Novo”), no entanto aplicando-se o Teste Q verifica-se que este valor não é um *outlier*, assim este foi utilizado no cálculo da média do índice PQ.

A Tab. 40 apresenta as concentrações dos elementos químicos obtidas a partir do espectrômetro de raios X, enquanto que os espectros produzidos estão ilustrados na Fig. 86.

Tabela 40 – Concentrações dos elementos químicos – LGQ07

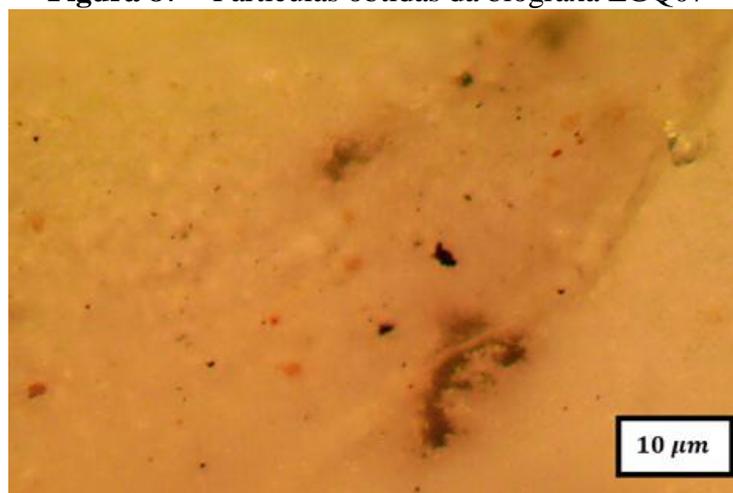
Elemento Químico	Símbolo	Concentração
Magnésio	Mg	95 (mg/kg)
Fósforo	P	0,0199 (Wt %)
Enxofre	S	0,0166 (Wt %)
Cloro	Cl	19.484,4 (mg/kg)
Cálcio	Ca	0 (Wt %)
Zinco	Zn	0,0015 (Wt %)
Ferro	Fe	9,5 (mg/kg)
Níquel	Ni	4,4 (mg/kg)
Cobalto	Co	0,9 (mg/kg)
Total		14,8 (mg/kg)

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 86 – Espectros produzidos na biograxa LGQ07

Fonte: Elaboração do próprio autor.

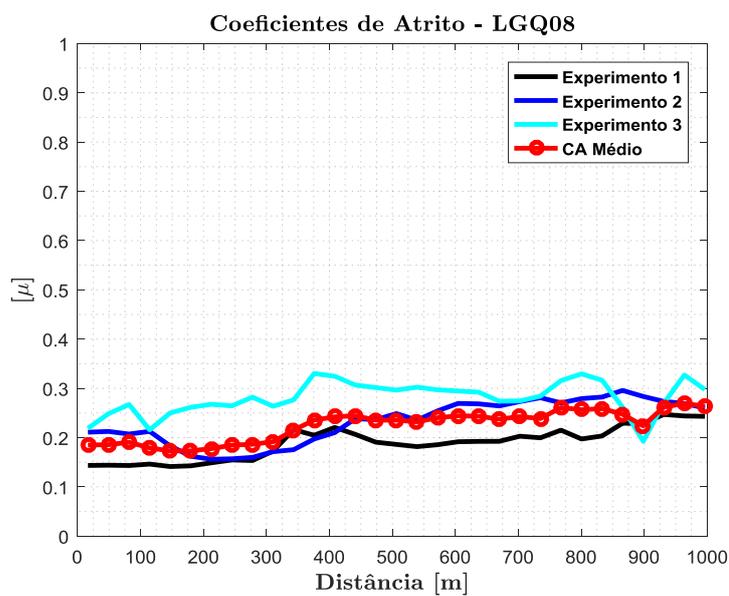
Observa-se na Fig. 87 algumas partículas pequenas e oxidadas, todas indicativas de desgaste normal por atrito.

Figura 87 – Partículas obtidas da biograxa LGQ07

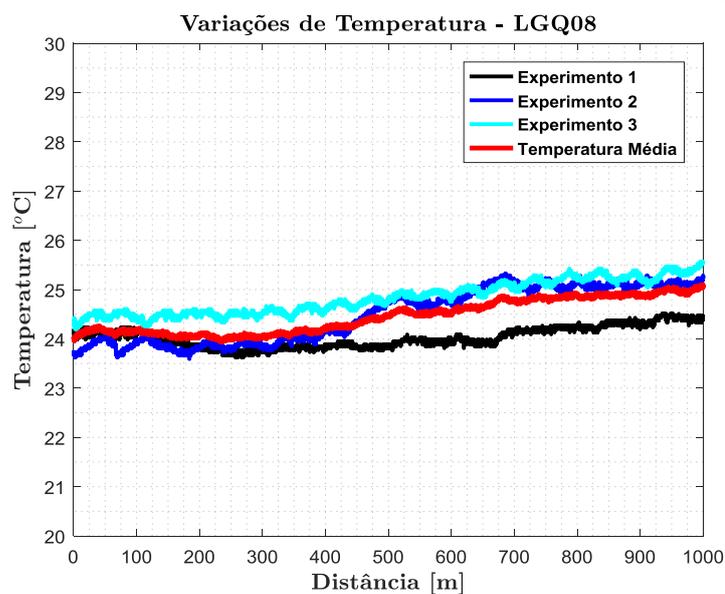
Fonte: Elaboração do próprio autor.

4.1.8 Biograxa LGQ08

As Fig. 88 e 89 a seguir, ilustram, respectivamente, os coeficientes de atrito e as variações de temperatura entre o pino e o disco determinadas nos ensaios com a biograxa LGQ08.

Figura 88 – Coeficientes de atrito da biograxa LGQ08

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 89 – Temperaturas na superfície de contato utilizando a biograxa LGQ08

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Na Tab. 41 a seguir destacam-se as principais análises dos resultados obtidos nas Fig. 88 e 89.

Tabela 41 – Principais resultados de coeficiente de atrito e temperatura – LGQ08

Ensaio	Coeficientes de Atrito			Temperaturas		
	m_{\max}	m_{\min}	m_{med}	T_{\max} (°C)	T_{\min} (°C)	V_{tp} (°C)
1°	0,247	0,141	0,189	24,61	23,63	0,98
2°	0,296	0,156	0,232	25,33	23,59	1,74
3°	0,330	0,192	0,281	25,71	24,19	1,52
Média	0,269	0,173	0,224	25,13	23,93	1,20

Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Tab. 42 apresenta os valores de perdas de massa e volume para cada ensaio realizado. Já a Tab. 43 contêm a quantificação de desgaste tanto para o pino como para o disco.

Tabela 42 – Valores de perdas de massa e volume das amostras – LGQ08

Ensaio	Pino (SAE 1040)		Disco (SAE 1040)	
	ML (g)	VL (mm ³)	ML (g)	VL (mm ³)
1°	0,0001	1,27*E-2	0,0003	3,82*E-2
2°	0,0004	5,10*E-2	0,0005	6,37*E-2
3°	0,0003	3,82*E-2	0,0003	3,82*E-2
Média	0,00027	3,39*E-2	0,0003	3,82*E-2

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 43 – Coeficientes e taxas de desgaste – LGQ08

Ensaio	Pino (SAE 1040)			Disco (SAE 1040)		
	K	γ (mm ³ /s)	α (mm ³)	K	γ (mm ³ /s)	α (mm ³)
1°	8,99*E-7	1,12*E-6	1,27*E-2	26,99*E-7	3,36*E-6	3,82*E-2
2°	35,99*E-7	4,48*E-6	5,10*E-2	44,99*E-6	5,61*E-6	6,37*E-2
3°	26,99*E-7	3,36*E-6	3,82*E-2	26,99*E-7	3,36*E-6	3,82*E-2
Média	23,99*E-7	2,99*E-6	3,39*E-2	26,99*E-7	3,39*E-6	3,82*E-2

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Ressalta-se que os valores em destaque nas tabelas são discrepantes, de acordo com o Teste Q de Dixon.

O índice PQ obtido através do PQA destaca-se na Tab. 44 a seguir, enquanto que as concentrações dos elementos químicos presentes na biograxa LGQ08 estão ilustradas na Tab. 45. Os espectros produzidos por estes elementos estão representados na Fig. 90.

Tabela 44 – Índices PQ determinados através do PQA – LGQ08

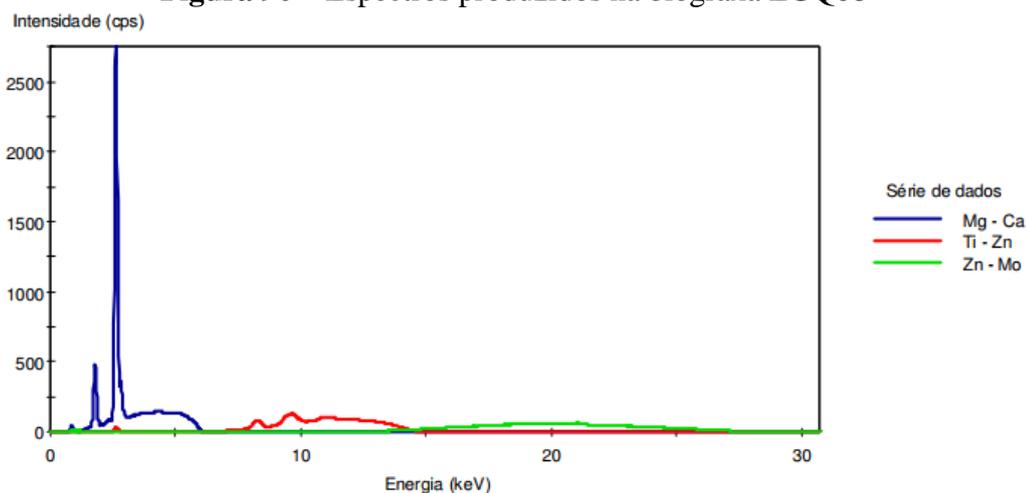
ÍNDICE PQ		
Medições	Novo	Utilizado
1º	23	25
2º	26	26
3º	22	26
4º	25	30
5º	26	28
6º	22	27
7º	24	26
8º	24	26
9º	22	26
10º	24	24
Média	23,8	26,4

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 45 – Concentrações dos elementos químicos – LGQ08

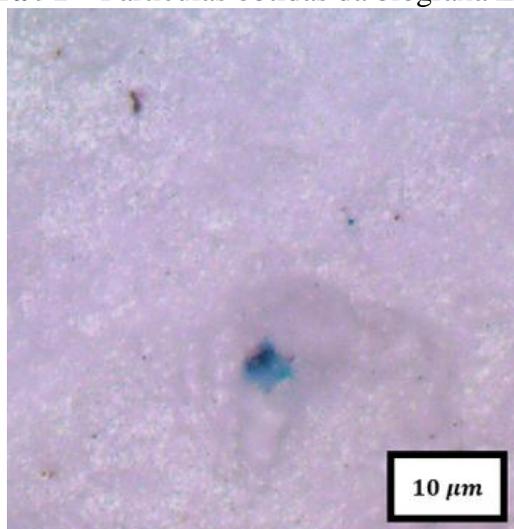
Elemento Químico	Símbolo	Concentração
Magnésio	Mg	71,5 (mg/kg)
Fósforo	P	0,0125 (Wt %)
Enxofre	S	0,0133 (Wt %)
Cloro	Cl	19.647,9 (mg/kg)
Cálcio	Ca	0 (Wt %)
Zinco	Zn	0,0012 (Wt %)
Ferro	Fe	4,2 (mg/kg)
Níquel	Ni	0 (mg/kg)
Cobalto	Co	0 (mg/kg)
Total		4,2 (mg/kg)

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 90 – Espectros produzidos na biograxa LGQ08

Fonte: Elaboração do próprio autor.

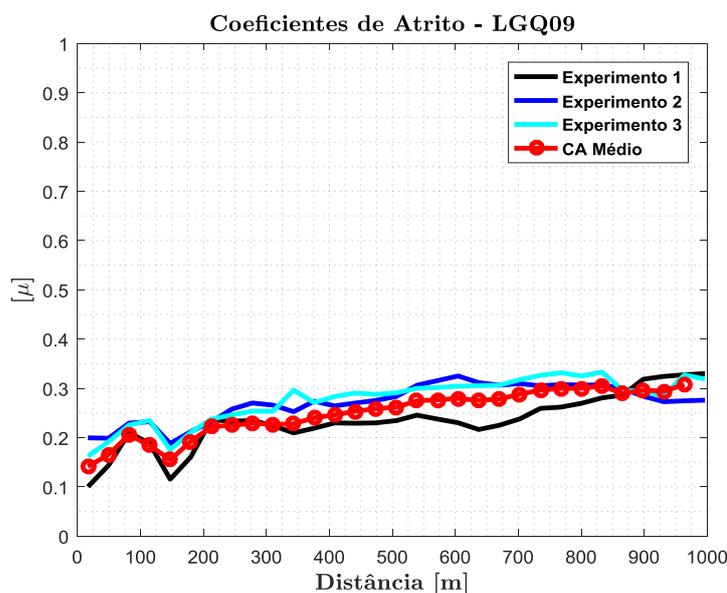
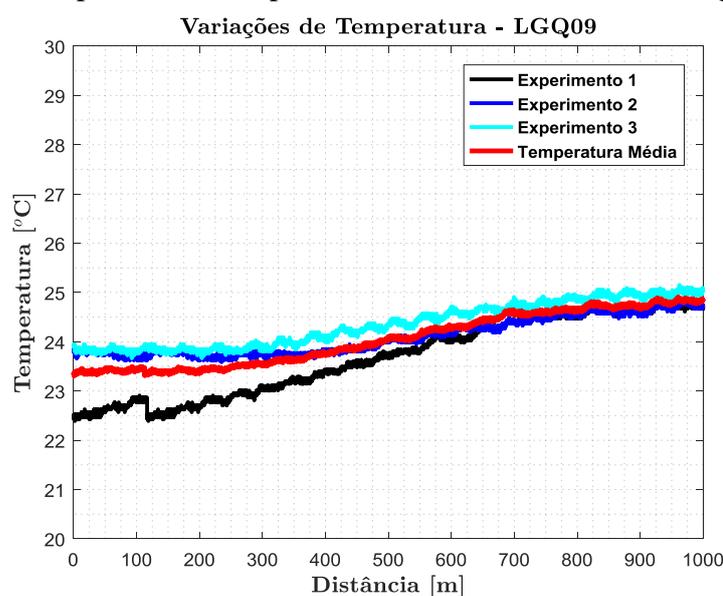
Através do ferrocópio obteve-se a Fig. 91 e nela pode-se observar uma pequena quantidade de partículas oxidadas, bem como algumas partículas azuladas, que podem estar relacionadas ao desgaste severo por deslizamento.

Figura 91 – Partículas obtidas da biograxa LGQ08

Fonte: Elaboração do próprio autor.

4.1.9 Biograxa LGQ09

Os gráficos de distância de deslizamento versus coeficiente de atrito e variação de temperatura entre o pino e o disco estão ilustrados nas Fig. 92 e 93 a seguir. Já as principais análises destes resultados destacam-se na Tab. 46.

Figura 92 – Coeficientes de atrito da biograxa LGQ09**Figura 93** – Temperaturas na superfície de contato utilizando a biograxa LGQ09**Tabela 46** – Principais resultados de coeficiente de atrito e temperatura – LGQ09

Ensaio	Coeficientes de Atrito			Temperaturas		
	m_{\max}	m_{\min}	m_{med}	T_{\max} (°C)	T_{\min} (°C)	V_{tp} (°C)
1°	0,330	0,100	0,234	24,91	22,39	2,52
2°	0,325	0,188	0,271	24,92	23,59	1,33
3°	0,333	0,162	0,277	25,19	23,67	1,52
Média	0,307	0,141	0,249	24,92	23,30	1,62

Fonte: Elaboração do próprio autor.

As Tab. 47 e 48 apresentam, respectivamente, os valores de perdas de massa e volume e a quantificação de desgaste tanto para o pino como para o disco em cada ensaio realizado.

Tabela 47 – Valores de perdas de massa e volume das amostras – LGQ09

Ensaio	Pino (SAE 1040)		Disco (SAE 1040)	
	ML (g)	VL (mm ³)	ML (g)	VL (mm ³)
1°	0,0002	2,55*E-2	0,0003	3,82*E-2
2°	0,0002	2,55*E-2	0,0003	3,82*E-2
3°	0,0001	1,27*E-2	0,0002	2,55*E-2
Média	0,00017	2,13*E-2	0,00027	3,39*E-2

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 48 – Coeficientes e taxas de desgaste – LGQ09

Ensaio	Pino (SAE 1040)			Disco (SAE 1040)		
	K	γ (mm ³ /s)	φ (mm ³)	K	γ (mm ³ /s)	φ (mm ³)
1°	17,99*E-7	2,24*E-6	2,55*E-2	26,99*E-7	3,36*E-6	3,82*E-2
2°	17,99*E-7	2,24*E-6	2,55*E-2	26,99*E-7	3,36*E-6	3,82*E-2
3°	8,99*E-7	1,12*E-6	1,27*E-2	17,99*E-7	2,24*E-6	2,55*E-2
Média	14,99*E-7	1,87*E-6	2,13*E-2	23,99*E-7	2,99*E-6	3,39*E-2

Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Tab. 49 a seguir destaca o índice PQ obtido através do PQA, enquanto que as concentrações dos elementos químicos presentes na amostra estão ilustradas na Tab. 50. Os espectros produzidos por estes elementos estão representados na Fig. 94.

Tabela 49 – Índices PQ determinados através do PQA – LGQ09

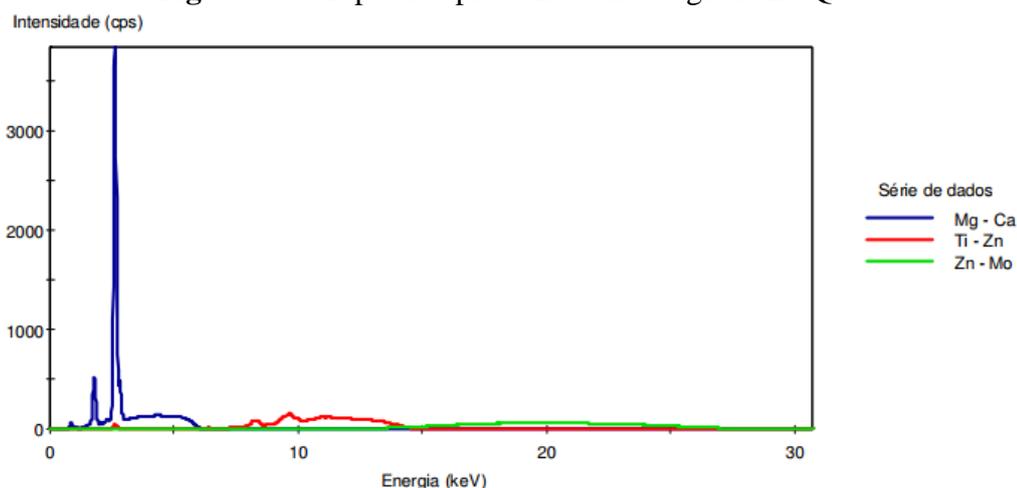
ÍNDICE PQ		
Medições	Novo	Utilizado
1º	20	59
2º	20	60
3º	19	61
4º	19	61
5º	19	62
6º	18	61
7º	19	62
8º	17	59
9º	18	60
10º	18	58
Média	18,7	60,3

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 50 – Concentrações dos elementos químicos – LGQ09

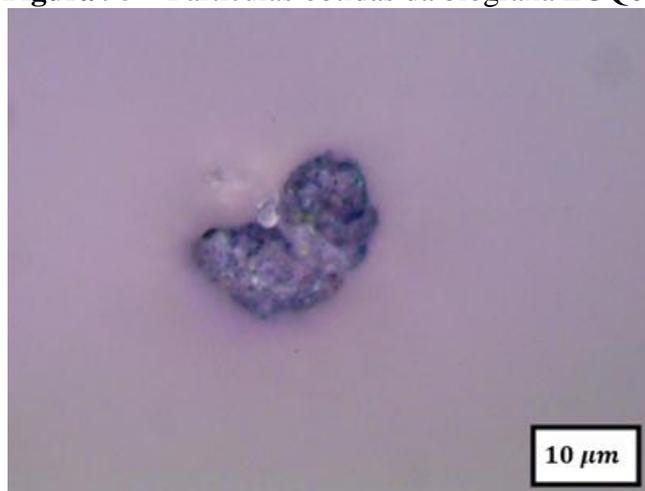
Elemento Químico	Símbolo	Concentração
Magnésio	Mg	48,1 (mg/kg)
Fósforo	P	0,0198 (Wt %)
Enxofre	S	0,0248 (Wt %)
Cloro	Cl	30.998,8 (mg/kg)
Cálcio	Ca	0 (Wt %)
Zinco	Zn	0,0001 (Wt %)
Ferro	Fe	28 (mg/kg)
Níquel	Ni	0 (mg/kg)
Cobalto	Co	0 (mg/kg)
Total		28 (mg/kg)

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 94 – Espectros produzidos na biograxa LGQ09

Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Fig. 95, obtida através do ferrocópio, apresenta a natureza das partículas encontradas na amostra da biograxa. Destaca-se um particulado de coloração azulada, indicativo de um possível desgaste severo.

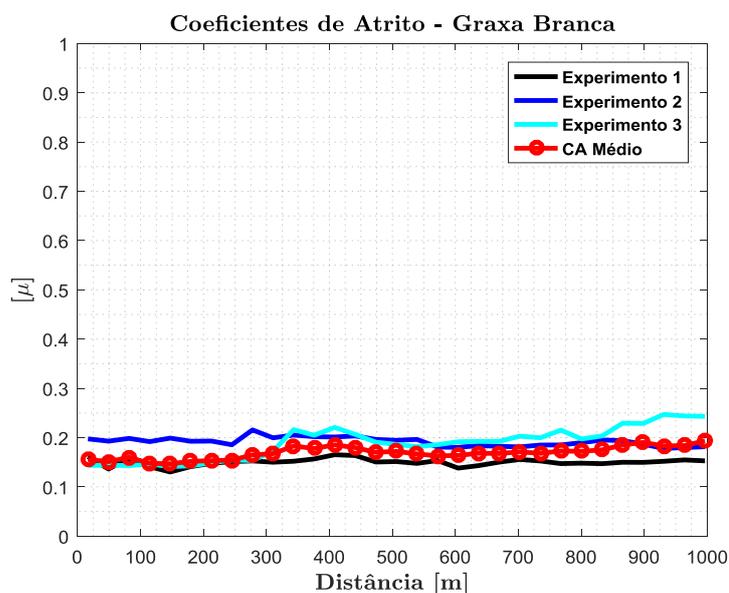
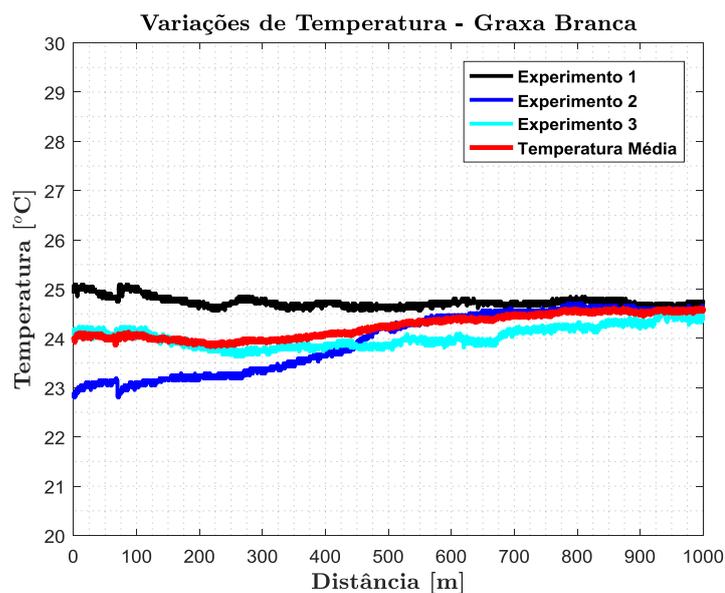
Figura 95 – Partículas obtidas da biograxa LGQ09

Fonte: Elaboração do próprio autor.

4.2 LUBRIFICANTES COMERCIAIS

4.2.1 Graxa para corrente Yourlub (Graxa Branca)

As Fig. 96 e 97 a seguir, ilustram, respectivamente, os coeficientes de atrito e as variações de temperatura entre o pino e o disco determinadas nos ensaios com a graxa comercial branca.

Figura 96 – Coeficientes de atrito utilizando graxa branca**Figura 97** – Temperaturas na superfície de contato utilizando graxa branca

Na Tab. 51 a seguir destacam-se as principais análises dos resultados obtidos nas figuras anteriores.

Tabela 51 – Principais resultados de coeficiente de atrito e temperatura – Graxa Branca

Ensaio	Coeficientes de Atrito			Temperaturas		
	m_{max}	m_{min}	m_{med}	T_{max} (°C)	T_{min} (°C)	V_{tp} (°C)
1°	0,165	0,130	0,150	25,09	24,57	0,52
2°	0,216	0,178	0,192	24,71	22,81	1,90
3°	0,250	0,139	0,187	24,65	23,68	0,97
Média	0,194	0,147	0,169	24,65	23,83	0,82

Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Tab. 52 apresenta os valores de perdas de massa e volume para cada ensaio realizado. Já a Tab. 53 contém a quantificação de desgaste tanto para o pino como para o disco.

Tabela 52 – Valores de perdas de massa e volume das amostras – Graxa Branca

Ensaio	Pino (SAE 1040)		Disco (SAE 1040)	
	ML (g)	VL (mm ³)	ML (g)	VL (mm ³)
1°	0,0003	3,82*E-2	0,0004	5,10*E-2
2°	0,0003	3,82*E-2	0,0004	5,10*E-2
3°	0,0003	3,82*E-2	0,0004	5,10*E-2
Média	0,0003	3,82*E-2	0,0004	5,10*E-2

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 53 – Coeficientes e taxas de desgaste – Graxa Branca

Ensaio	Pino (SAE 1040)			Disco (SAE 1040)		
	K	γ (mm ³ /s)	α (mm ³)	K	γ (mm ³ /s)	α (mm ³)
1°	26,99*E-7	3,36*E-6	3,82*E-2	35,99*E-7	4,48*E-6	5,10*E-2
2°	26,99*E-7	3,36*E-6	3,82*E-2	35,99*E-7	4,48*E-6	5,10*E-2
3°	26,99*E-7	3,36*E-6	3,82*E-2	35,99*E-7	4,48*E-6	5,10*E-2
Média	26,99*E-7	3,36*E-6	3,82*E-2	35,99*E-7	4,48*E-6	5,10*E-2

Fonte: Elaboração do próprio autor.

O índice PQ obtido através do PQA destaca-se na Tab. 54 a seguir. As concentrações dos elementos químicos obtidas através do espectrômetro de raios X estão ilustradas na Tab. 55, enquanto que os espectros produzidos por estes elementos estão representados na Fig. 98.

Tabela 54 – Índices PQ determinados através do PQA – Graxa Branca

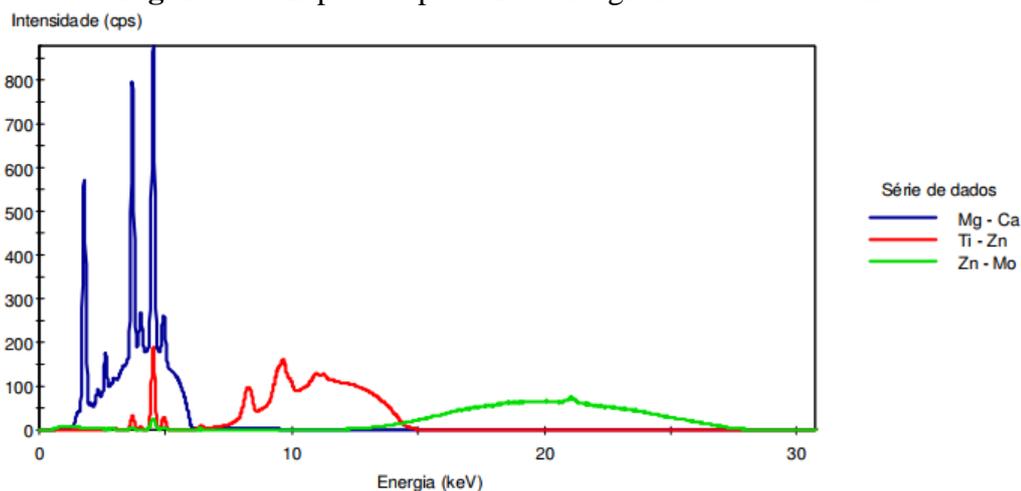
ÍNDICE PQ		
Medições	Novo	Utilizado
1º	8	14
2º	9	17
3º	9	18
4º	11	14
5º	9	16
6º	12	20
7º	9	18
8º	10	17
9º	10	20
10º	9	14
Média	9,6	16,8

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 55 – Concentrações dos elementos químicos – Graxa Branca

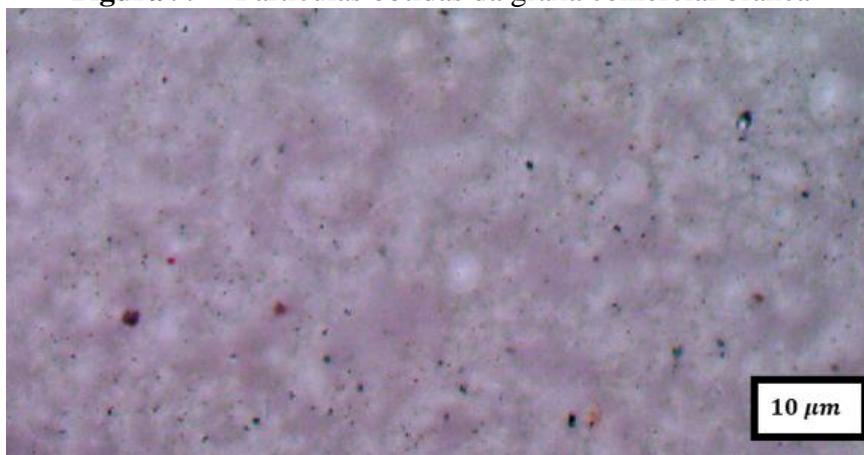
Elemento Químico	Símbolo	Concentração
Magnésio	Mg	184,2 (mg/kg)
Fósforo	P	0,0179 (Wt %)
Enxofre	S	0,0192 (Wt %)
Cloro	Cl	628,2 (mg/kg)
Cálcio	Ca	0,2254 (Wt %)
Zinco	Zn	0,0013 (Wt %)
Ferro	Fe	34,6 (mg/kg)
Níquel	Ni	5 (mg/kg)
Cobalto	Co	2 (mg/kg)
Total		41,6 (mg/kg)

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 98 – Espectros produzidos na graxa comercial branca

Fonte: Elaboração do próprio autor.

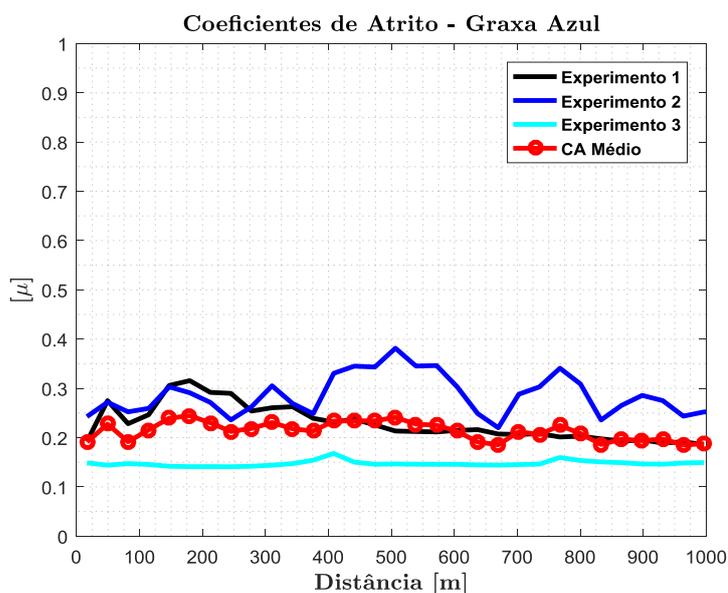
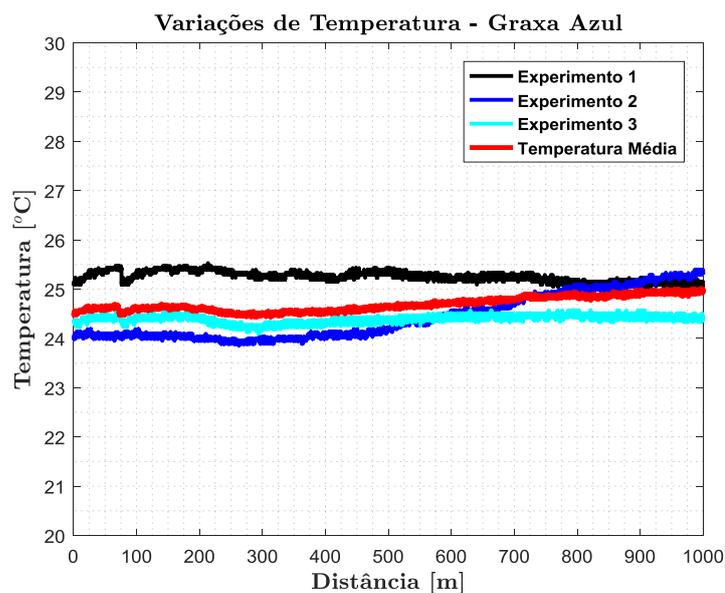
A natureza das partículas encontradas na amostra da graxa branca está ilustrada na Fig. 99. Observa-se uma grande quantidade de particulados oxidados, indicativos de um desgaste normal por atrito.

Figura 99 – Partículas obtidas da graxa comercial branca

Fonte: Elaboração do próprio autor.

4.2.2 Graxa FAG multiuso (Graxa Azul)

Os gráficos de distância de deslizamento versus coeficiente de atrito e variação de temperatura entre o pino e o disco estão ilustrados nas Fig. 100 e 101 a seguir. Já as principais análises destes resultados destacam-se na Tab. 56.

Figura 100 – Coeficientes de atrito utilizando graxa azul**Figura 101** – Temperaturas na superfície de contato utilizando graxa azul**Tabela 56** – Principais resultados de coeficiente de atrito e temperatura – Graxa Azul

Ensaio	Coeficientes de Atrito			Temperaturas		
	m_{\max}	m_{\min}	m_{med}	T_{\max} (°C)	T_{\min} (°C)	V_{tp} (°C)
1°	0,316	0,186	0,229	25,53	24,95	0,58
2°	0,382	0,220	0,285	25,43	23,85	1,58
3°	0,168	0,141	0,147	24,57	24,09	0,48
Média	0,244	0,185	0,213	25,02	24,44	0,58

Fonte: Elaboração do próprio autor.

As Tab. 57 e 58 apresentam, respectivamente, os valores de perdas de massa e volume e a quantificação de desgaste tanto para o pino como para o disco em cada ensaio realizado.

Tabela 57 – Valores de perdas de massa e volume das amostras – Graxa Azul

Ensaio	Pino (SAE 1040)		Disco (SAE 1040)	
	ML (g)	VL (mm ³)	ML (g)	VL (mm ³)
1°	0,0002	2,55*E-2	0,0003	3,82*E-2
2°	0,0003	3,82*E-2	0,0004	5,10*E-2
3°	0,0002	2,55*E-2	0,0004	5,10*E-2
Média	0,00023	2,97*E-2	0,00037	4,67*E-2

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 58 – Coeficientes e taxas de desgaste – Graxa Azul

Ensaio	Pino (SAE 1040)			Disco (SAE 1040)		
	K	y(mm ³ /s)	q(mm ³)	K	y(mm ³ /s)	q(mm ³)
1°	17,99*E-7	2,24*E-6	2,55*E-2	26,99*E-7	3,36*E-6	3,82*E-2
2°	26,99*E-7	3,36*E-6	3,82*E-2	35,99*E-7	4,48*E-6	5,10*E-2
3°	17,99*E-7	2,24*E-6	2,55*E-2	35,99*E-7	4,48*E-6	5,10*E-2
Média	20,99*E-7	2,61*E-6	2,97*E-2	32,99*E-7	4,11*E-6	4,67*E-2

Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Tab. 59 a seguir destaca o índice PQ obtido através do PQA, enquanto que as concentrações dos elementos químicos presentes na amostra estão ilustradas na Tab. 60. Os espectros produzidos por estes elementos estão representados na Fig. 102.

Tabela 59 – Índices PQ determinados através do PQA – Graxa Azul

ÍNDICE PQ		
Medições	Novo	Utilizado
1º	10	12
2º	8	12
3º	9	17
4º	10	14
5º	9	13
6º	11	15
7º	9	12
8º	8	13
9º	6	14
10º	8	12
Média	8,8	13,4

Fonte: Elaboração do próprio autor.

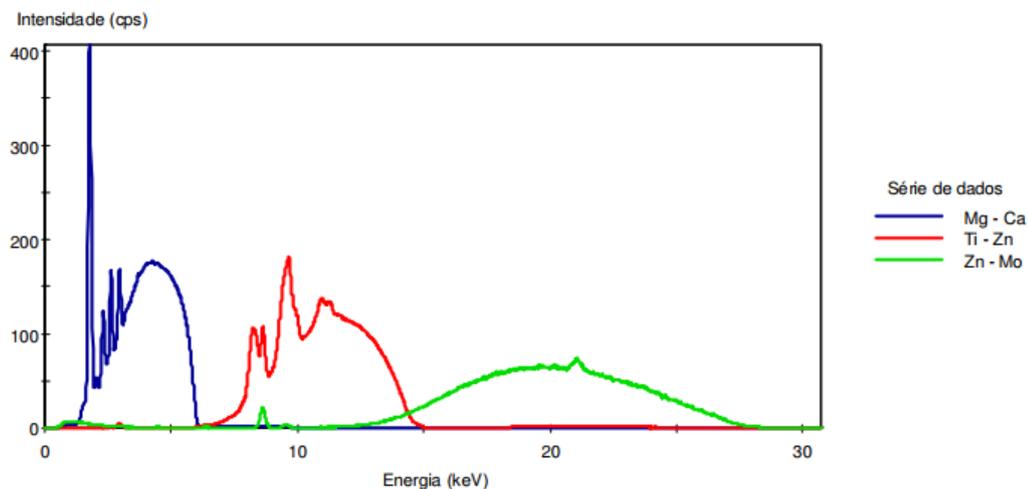
Ressalta-se que a análise dos dados da Tab. 59 indicou a presença de um valor suspeito (6 na coluna “Novo”), no entanto aplicando-se o Teste Q verifica-se que este valor não é um *outlier*, assim este é utilizado no cálculo da média do índice PQ.

Tabela 60 – Concentrações de partículas – Graxa Azul

Elemento Químico	Símbolo	Concentração
Magnésio	Mg	0 (mg/kg)
Fósforo	P	0,0057 (Wt %)
Enxofre	S	0,0387 (Wt %)
Cloro	Cl	540,9 (mg/kg)
Cálcio	Ca	0,0026 (Wt %)
Zinco	Zn	0,0132 (Wt %)
Ferro	Fe	6,1 (mg/kg)
Níquel	Ni	10,5 (mg/kg)
Cobalto	Co	5,5 (mg/kg)
Total		22,1 (mg/kg)

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 102 – Espectros produzidos na graxa comercial azul



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Fig. 103 apresenta a natureza das partículas encontradas na amostra da graxa azul. A imagem foi obtida com uma lente de aumento em 500 vezes, onde destaca-se uma partícula muito maior em relação às outras, embora isso não represente algum indício de anormalidade.

Figura 103 – Partículas obtidas da graxa comercial azul



Fonte: Elaboração do próprio autor.

4.3 ANÁLISE COMPARATIVA

A Tab. 61 foi desenvolvida com o intuito de facilitar uma análise comparativa entre os resultados obtidos, tanto para as biograxas quanto para as graxas minerais comerciais. Nela, destacam-se os principais: coeficiente médio de atrito, variação média de temperatura na superfície de contato entre o pino e disco, taxa média de desgaste e perda média de volume.

Ressalta-se que os resultados obtidos através do espectrômetro de raios X, PQA e ferrosκόpio não são considerados “principais”, pelo fato de que somente uma pequena parcela dos lubrificantes utilizados nos experimentos (1 grama) foram submetidos nesses instrumentos. Isso ocorreu devido à dificuldade em conseguir extrair das amostras, pós-experimento, as possíveis partículas de desgastes presentes.

Tabela 61 – Principais resultados obtidos das biograxas e graxas

Legenda	m_{med}	$V_{tp}(^{\circ}C)$	Pino		Disco	
			$\gamma(mm^3/s)$	$VL(mm^3)$	$\gamma(mm^3/s)$	$VL(mm^3)$
Biograxas						
LGQ01	0,293	1,69	1,12*E-6	1,27*E-2	4,48*E-6	5,10*E-2
LGQ02	0,316	1,18	2,98*E-6	3,39*E-2	2,61*E-6	2,97*E-2
LGQ03	0,368	2,19	13,83*E-6	15,7*E-2	9,35*E-6	10,6*E-2
LGQ04	0,098	1,13	4,11*E-6	4,67*E-2	2,24*E-6	2,55*E-2
LGQ05	0,144	1,28	1,87*E-6	2,13*E-2	1,12*E-6	1,27*E-2
LGQ06	0,303	1,24	3,36*E-6	3,82*E-2	1,49*E-6	1,69*E-2
LGQ07	0,154	1,43	1,87*E-6	2,13*E-2	2,24*E-6	2,55*E-2
LGQ08	0,224	1,20	2,99*E-6	3,39*E-2	3,39*E-6	3,82*E-2
LGQ09	0,249	1,62	1,87*E-6	2,13*E-2	2,99*E-6	3,39*E-2
Graxas						
Azul	0,213	0,58	2,61*E-6	2,97*E-2	4,11*E-6	4,67*E-2
Branca	0,169	0,82	3,36*E-6	3,82*E-2	4,48*E-6	5,10*E-2

Fonte: Elaboração do próprio autor.

De acordo com a Tab. 5, descrita no capítulo anterior, e a Tab. 61, primeiramente será feita uma discussão entre os grupos de lubrificantes, afim de gerar uma classificação qualitativa. Após a próxima seção, onde serão discutidos os resultados das análises dos sinais de vibrações, poderá ser feita uma discussão final sobre o assunto.

As amostras destacadas em amarelo foram desenvolvidas a partir de um processo direto de saponificação do óleo de soja à base de hidróxido de sódio (sabão). O desempenho desse grupo comparado com os outros foi o pior, principalmente em relação aos coeficientes de atrito. Em uma classificação de desempenho, do pior ao melhor, tem-se: LGQ03 < LGQ02 < LGQ01.

As amostras em destaque verde foram desenvolvidas a partir de um processo misturando sabão (à base de hidróxido de lítio), produzido separadamente, com o óleo de soja.

Apesar da biograxa LGQ04 apresentar as maiores perdas de volume, ainda sim teve a melhor performance. Assim, a classificação deste grupo é: $LGQ06 < LGQ05 < LGQ04$.

Já as amostras alaranjadas foram desenvolvidas a partir de um processo direto de saponificação do óleo de soja à base de hidróxido de lítio (sabão). Este grupo foi o que apresentou uma menor variação nos resultados, ou seja, o desempenho de ambas as biograxas foram semelhantes. No entanto, em uma classificação de performance tem-se: $LGQ09 < LGQ08 < LGQ07$.

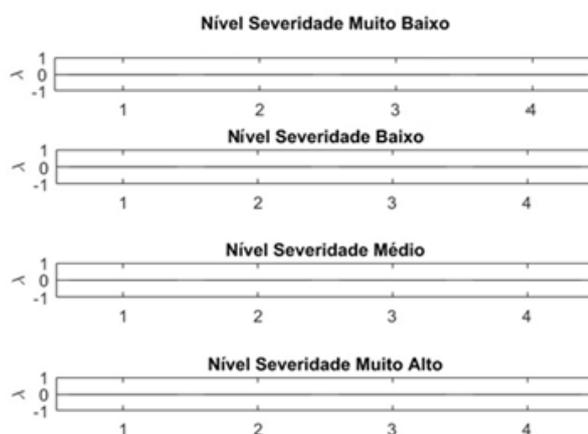
As graxas comerciais apresentaram performances tribológicas semelhantes, contudo em uma classificação, a graxa branca seria superior à azul: $Graxa\ Azul < Graxa\ Branca$.

4.4 ANÁLISE ARTIFICIAL DE SELEÇÃO NEGATIVA

Após a coleta dos dados experimentais, como o objetivo do trabalho é a validação das biograxas comparando-as com as graxas comerciais, ao adotar o algoritmo de seleção negativa (ASN) como ferramenta para o processamento de sinais, considerou-se admitir que os sinais vibratórios das graxas azul e branca representariam um comportamento normal, ou seja, sem falhas, e com isso gerou-se um banco de dados (*baselines*) de sinais denominados Sinais Próprios.

Os sinais vibratórios provenientes das biograxas representariam um comportamento anormal, ou seja, de introdução de falhas, assim criou-se um banco de dados de sinais de denominação de Sinais Não-Próprios. Estes são comparados aos Sinais Próprios a fim de se verificar a afinidade entre eles considerando um desvio-padrão de 3% e assim classificá-los como falha ou não-falha. Ressalta-se que a taxa de afinidade considerada foi de 70%.

Primeiramente, afim de facilitar a análise dos resultados, será explanado graficamente como o algoritmo realiza o diagnóstico, conforme a Fig. 104 a seguir.

Figura 104 – Classificação dos sinais de vibração

Fonte: Elaboração do próprio autor.

De acordo com a Fig. 104, após comparar o Sinal Não-Próprio com o Sinal Próprio, o algoritmo classifica-o de acordo com o nível de severidade: Muito Baixo, Baixo, Médio e Muito Alto. Além disso, cada nível é subdividido em quatro intervalos: 1, 2, 3 e 4.

Cada um desses intervalos representam a quantidade de sinal vibratório que foi detectado, sendo que no nível 1, a faixa de vibração varia de 0 a 25%, no nível 2 varia de 25 a 50%, no nível 3 varia de 50 a 75% e no nível 4 varia de 75 a 100%.

A seguir, as Fig. 105 a 114 apresentam os resultados obtidos ao considerar a graxa branca como Sinal Próprio. Destaca-se que, para fins de curiosidade, a graxa azul foi aceita como Sinal Não-Próprio, como observa-se na Fig. 105.

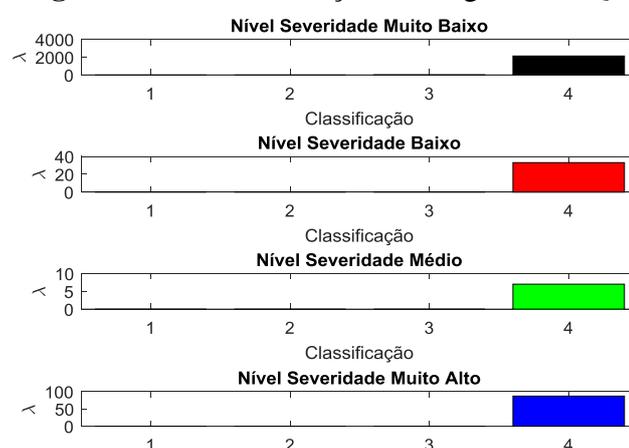
Figura 105 – Classificação da graxa azul

Fonte: Elaboração do próprio autor.

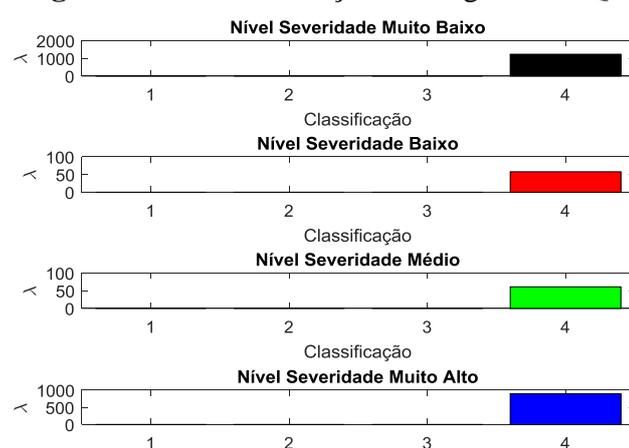
Primeiramente, em relação a graxa azul, apesar de ser da mesma classe da graxa branca (graxa mineral), foi classificada em três níveis de severidade, e visto do ponto de vista vibratório, não apresenta um comportamento semelhante à graxa branca.

Figura 106 – Classificação da biograxa LGQ01

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 107 – Classificação da biograxa LGQ02

Fonte: Elaboração do próprio autor.

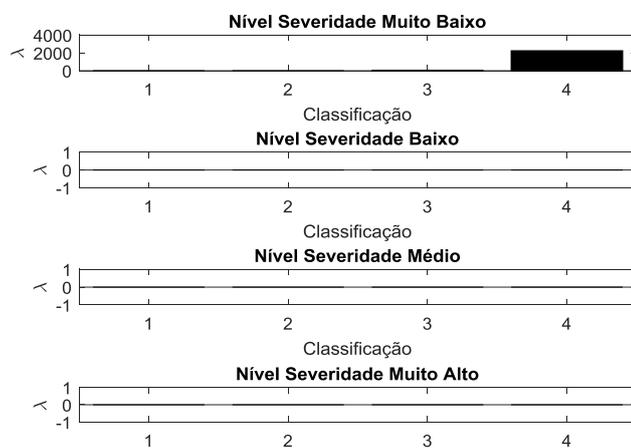
Figura 108 – Classificação da biograxa LGQ03

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Complementando as análises feitas na seção anterior, nota-se que no grupo das biograxas destacadas em amarelo na Tab. 61, todas foram classificadas nos quatro níveis de severidade. Inclusive, a amplitude alcançada pelos sinais dentro do nível de severidade “muito

alto” demonstra o quão agressivo foram os ensaios, o que comprova o desempenho insatisfatório desse grupo.

Figura 109 – Classificação da biograxa LGQ04



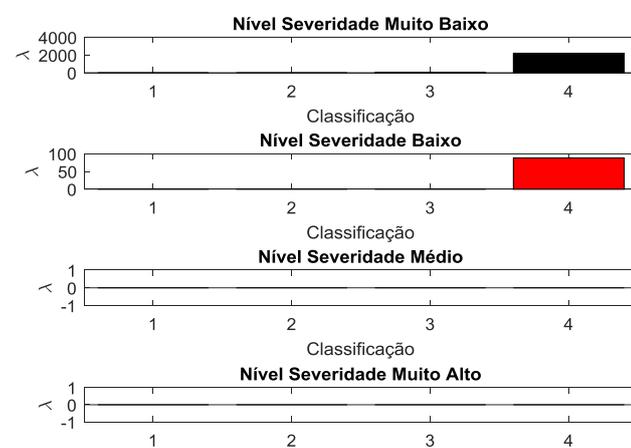
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 110 – Classificação da biograxa LGQ05



Fonte: Elaboração do próprio autor.

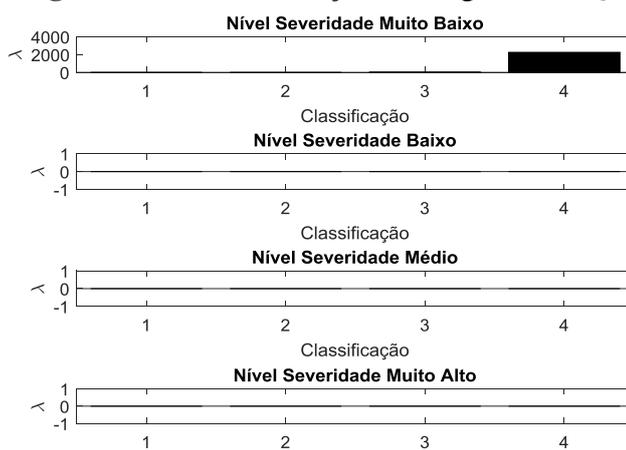
Figura 111 – Classificação da biograxa LGQ06



Fonte: Elaboração do próprio autor.

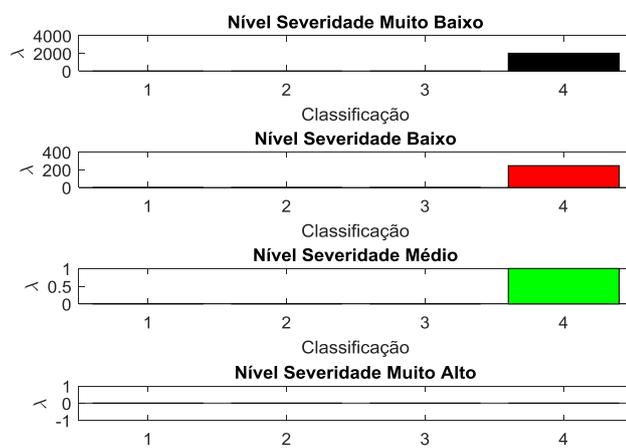
As amostras esverdeadas foram classificadas em apenas dois níveis de severidade: “nível de severidade baixo” e “nível de severidade muito baixo”. A biograxa LGQ06 foi a única que recebeu as duas classificações, enquanto que as biograxas LGQ04 e LGQ05 receberam apenas a inferior. Inclusive, isso corrobora com a classificação dada a este grupo anteriormente.

Figura 112 – Classificação da biograxa LGQ07

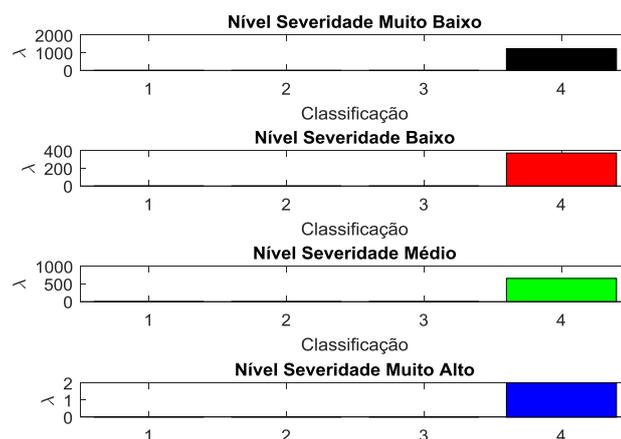


Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 113 – Classificação da biograxa LGQ08



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 114 – Classificação da biograxa LGQ09

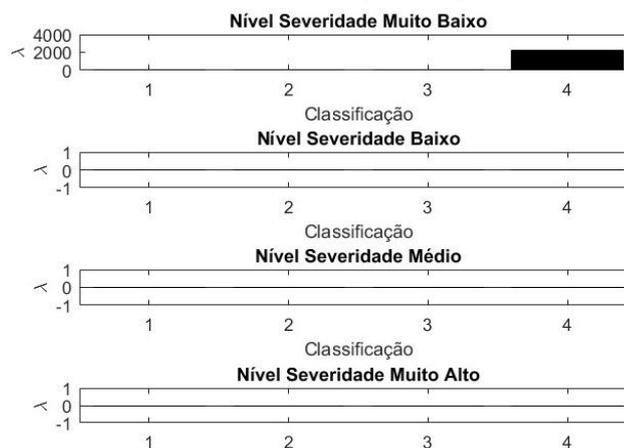
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Já as amostras destacadas em laranja receberam classificações em todos os níveis de severidade. Justificando a classificação de performance, a biograxa LGQ07 classificou-se em “muito baixo”, a LGQ08 classificou-se do “muito baixo” ao “médio” e a LGQ09 em todos os quatro níveis.

No entanto, conforme analisado anteriormente, este grupo apresentou performances semelhantes, e embora exista esta diversidade na classificação dos sinais de vibração, não há uma grande amplitude alcançada por estes sinais nos níveis mais severos.

Curiosamente, nota-se que todos os lubrificantes obtiveram apenas classificações no intervalo 4, ou seja, na faixa que varia entre 75 e 100% da frequência de vibração. Isso significa que ao adotar um desvio-padrão de 3% (pequena variação), 75% dos pontos em comparação (biograxas) se distanciam do comportamento das graxas comerciais em análise.

Agora, as Fig. 115 a 124 apresentam os resultados obtidos ao considerar a graxa azul como Sinal Próprio. Da mesma forma, aceita-se a graxa branca como um Sinal Não-Próprio.

Figura 115 – Classificação da graxa branca

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Observa-se que ao considerar a graxa branca um Sinal Não-Próprio, esta foi classificada em um nível de severidade “muito baixo”, o que significa que esta graxa possui um comportamento vibratório semelhante a graxa azul.

Figura 116 – Classificação da biograxa LGQ01



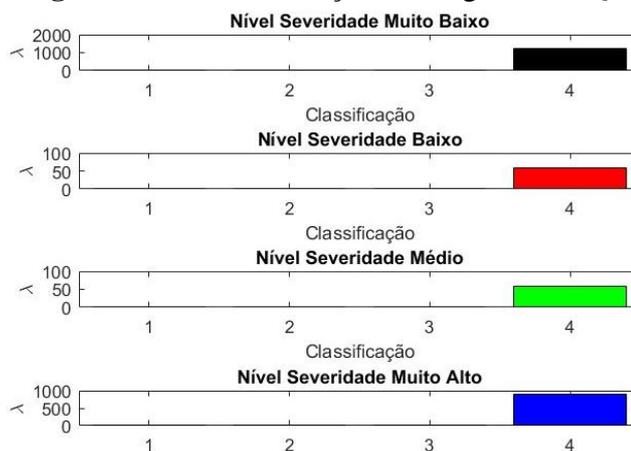
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 117 – Classificação da biograxa LGQ02

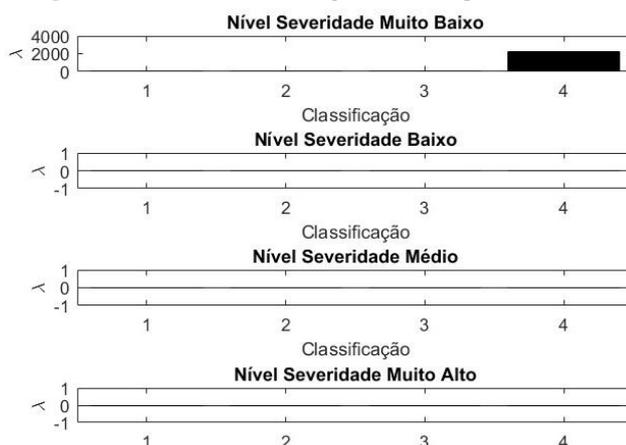


Fonte: Elaboração do próprio autor.

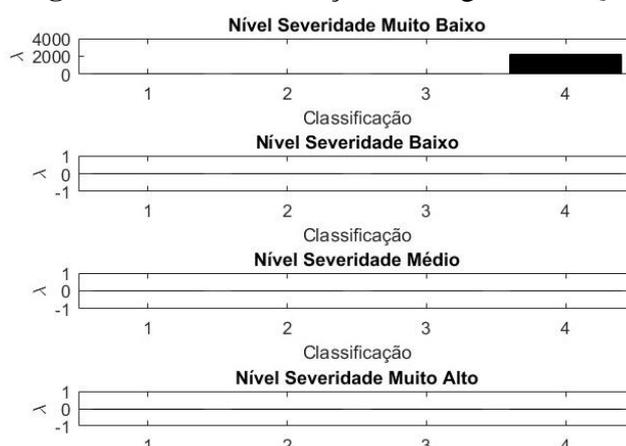
Figura 118 – Classificação da biograxa LGQ03



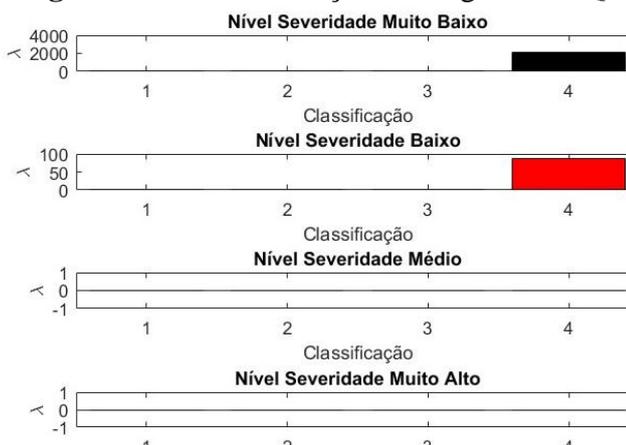
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 119 – Classificação da biograxa LGQ04

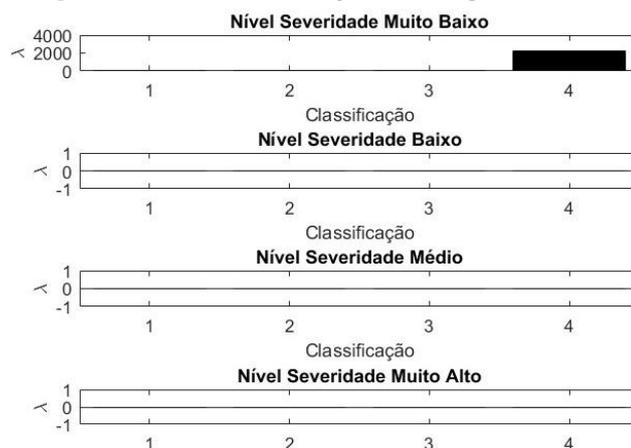
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 120 – Classificação da biograxa LGQ05

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 121 – Classificação da biograxa LGQ06

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 122 – Classificação da biograxa LGQ07

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 123 – Classificação da biograxa LGQ08

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 124 – Classificação da biograxa LGQ09

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Vale ressaltar que, curiosamente, os três grupos de biograxas apresentaram o mesmo comportamento vibratório. Isso fica explícito ao observar que os gráficos classificatórios do

algoritmo de seleção negativa apresentaram o mesmo resultado tanto utilizando a graxa branca como a graxa azul como Sinais Próprios.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo destina-se às considerações finais acerca desta dissertação, bem como sugestões de trabalhos futuros com o intuito de explorar novas conclusões sobre o assunto.

5.1 CONCLUSÕES

Esta dissertação apresentou conceitos e técnicas de manutenção preditiva, tais como a análise de partículas de desgaste e o monitoramento dos sinais de vibração, para validar o comportamento de graxas desenvolvidas a partir de fontes biodegradáveis.

Esta pesquisa tem como público alvo os estudantes de graduação e de pós-graduação, técnicos, docentes, pesquisadores e profissionais que compartilham do interesse pelo avanço e desenvolvimento das Ciências Mecânicas no Brasil, em especial na área de energia renováveis e seus desafios frente a engenharia.

As elevadas demandas de energia resultantes da industrialização e do crescimento populacional, e a grande dependência atual das fontes de energia não renováveis tornaram-se motivos de assuntos preocupantes, pois o seu término causará sérios impactos. Além disso, os graves impactos ambientais associados ao uso de produtos petrolíferos reforçam a ideia de introduzir combustíveis e lubrificantes alternativos a partir de matérias-primas renováveis.

Ressalta-se que as biograxas desenvolvidas e analisadas neste estudo apresentam uma grande e positiva vantagem em relação às graxas minerais comerciais: não possuem aditivos em sua composição. Isso significa um menor custo de produção destas graxas.

De acordo com a análise dos resultados, estes se mostraram satisfatórios e confirmam que os objetivos definidos para este projeto foram alcançados. A utilização, em conjunto, das duas principais técnicas de manutenção preditiva confirma que a metodologia experimental utilizada para a validação das biograxas demonstrou-se eficaz e precisa.

Com relação as biograxas, tem-se que as amostras LGQ04, LGQ05 e LGQ07 apresentaram performances semelhantes as graxas minerais comerciais.

As biograxas LGQ06 e LGQ08, ainda que não exibissem desempenhos satisfatórios, demonstram que através de possíveis modificações químicas, como a adição de aditivos por exemplo, possam adquirir melhores propriedades e ter uma melhor performance.

Já o grupo das biograxas LGQ01, LGQ02 e LGQ03 obteve desempenhos inferiores com relação ao restante das biograxas.

Portanto, pode-se concluir que o tipo de processo de fabricação das graxas não é um fator crucial relacionado ao seu desempenho, mas sim o tipo de espessante (sabão) utilizado no processo. As biograxas LGQ01, LGQ02 e LGQ03 são produzidas com espessantes de sódio, já as biograxas LGQ04 a 09 com espessantes de lítio.

5.2 TRABALHOS FUTUROS

A seguir, tem-se algumas sugestões de trabalhos que complementariam esta pesquisa de maneira interessante:

- Variar os parâmetros experimentais, tais como carga e velocidade, já que neste trabalho todos os ensaios foram feitos com os parâmetros constantes. A variação de parâmetros teria como consequência, um algoritmo de aprendizagem, no caso o de seleção negativa, mais especialista;
- Utilizar outros materiais comumente utilizados na indústria mecânica para a realização de testes;
- Aplicar o algoritmo de seleção negativa entre os sinais de biograxas já coletados, conforme foi realizado entre as graxas comerciais; e
- Tentar desenvolver algum método eficiente de extração total do óleo da graxa, e conseqüentemente as partículas de desgaste contidas nele. Assim, o método de ferrografia analítica poderia ser aplicado, o que facilitaria a vida do pesquisador ou profissional da área de tribologia.

REFERÊNCIAS

ABDULBARI, H. A.; AKINDOYO, E. O.; MAHMOOD, W. K. Renewable resource-based lubricating greases from natural and synthetic sources: insights and future challenges. **ChemBioEng Reviews**, Weinheim, v. 2, p. 406–422, 2015.

ABDULBARI, H. A.; ZUHAN, N. Grease formulation from palm oil industry wastes. **Waste and Biomass Valorization**, Dordrecht, v. 9, p. 2447-2457, 2018.

ALQUILABOR. **Sistema de filtração de membrana com rolha de silicone**. Alquilabor, 2020. Disponível em: <http://alquilabor.com.br/review/product/list/id/404/category/15/>. Acesso em: 01 mar. 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E140**: standard hardness conversion tables for metals relationship among brinell hardness, vickers hardness, rockwell hardness, superficial hardness, knoop hardness, scleroscope hardness, and leeb hardness. West Conshohocken: ASTM International, 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM G99-17**: standard test method for wear testing with a pin-on-disk apparatus. West Conshohocken: ASTM International, 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM D217-17**: standard test methods for cone penetration of lubricating grease. West Conshohocken: ASTM International, 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM D566-17**: standard test method for dropping point of lubricating grease. West Conshohocken: ASTM International, 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM D4175-19e1**: standard terminology relating to petroleum products, liquid fuels, and lubricants. West Conshohocken: ASTM International, 2019.

ARATO JUNIOR, A. **Manutenção preditiva usando análise de vibrações**. Barueri: Manole, 2004. 190 p.

ARCHARD, J. F. Contact and rubbing of flat surfaces. **Journal of Applied Physics**, Melville, v. 24, n. 8, p. 981 - 988, 1953.

ARCHARD, J. F. A Crossed-Cylinders friction machine. **Wear: An International Journal on the Science and Technology of Friction, Lubrication and Wear**, Lausanne, v. 2, n. 1, p. 21 – 27, 1958.

ARCHARD, J. F. Friction between Metal Surfaces. **Wear: An International Journal on the Science and Technology of Friction, Lubrication and Wear**, Lausanne, v. 113, n. 1, p. 3 - 16, 1986.

ARCHARD, J. F.; HIRST, W. The wear of metals under unlubricated conditions. **Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences**, London, v. 236, n. 1206, p. 397 - 410, 1956.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 5462**: confiabilidade e manutenibilidade. Rio de Janeiro: ABNT, 1994. 37 p.

BAYER, R. G. **Mechanical wear fundamentals and testing**. 2. ed. New York: Marcel Dekker, 2004., 402 p.

BHUSHAN, B. **Modern tribology handbook**. Boca Raton: CRC, 2000. 1728 p. v. 1.

BHUSHAN, B. **Introduction to tribology**. 2. ed. West Sussex: John Wiley & Sons, 2013. 711 p.

BOWEN, E. R.; WESTCOTT, V. C. **Wear particle atlas**. Lakehurst: Naval Air Engineering Center, 1982.

BRASIL. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis - ANP. **Lubrificantes**. Brasília, DF, 2020. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/petroleo-derivado/lubrificantes>. Acesso em: 14 jan. 2020.

BRASIL. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis - ANP. **Petróleo e derivados**. Brasília, DF, 2020. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/petroleo-derivado>. Acesso em: 2 abr. 2020.

CASTRO, L. N. **Engenharia imunológica**: desenvolvimento e aplicação de ferramentas computacionais inspiradas em sistemas imunológicos artificiais. 2001. 302 f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.

CARRETEIRO, R. P.; BELMIRO, P. N. A. **Lubrificantes e lubrificação industrial**. Rio de Janeiro: Interciência: IBP, 2006. 504 p.

CHAN, C.-H.; TANG, S. W.; MOHD, N. K.; LIM, W. H.; YEONG, S. K.; IDRIS, Z. Tribological behavior of biolubricant base stocks and additives. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Oxford, v. 93, p. 145–157, 2018.

CUNHA, R. C. **Análise do estado de conservação de um redutor de velocidade através da técnica de partículas de desgaste no óleo lubrificante auxiliada pela análise de vibrações**. 2005. 163 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2005.

DASGUPTA, D. **Artificial immune systems and their applications**. New York: Springer, 1999. 306 p.

DIXON, W. J. Ratios involving extreme values. **The Annals of Mathematical Statistics**, Shaker Heights, v. 22, n. 1, p. 68–78, 1951.

DWIVEDI, M. C.; SAPRE, S. Total vegetable-oil based greases prepared from castor oil. **Journal of Synthetic Lubrication**, Kent, v. 19, n. 3, p. 229-241, 2002.

FARRAR, C. R.; WORDEN, K. An introduction to structural health monitoring. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, London, v. 365, n. 1851, p. 303-315, 2007.

FIGUEIREDO, E.; PARK, G.; FARRAR, C. R.; WORDEN, K.; FIGUEIRAS, J. Machine learning algorithms for damage detection under operational and environmental variability. **Structural Health Monitoring, Sage Publications Sage**, London, v. 10, n. 6, p. 559-572, 2011.

FIGUEIREDO, E.; MOLDOVAN, I.; MARQUES, M. B. **Condition assessment of bridges: past, present and future a complementary approach**. Lisboa: Universidade Católica Editora, 2013. 185 p.

FORREST, S.; PERELSON, A. S.; ALLEN, L.; CHERUKURI, R. Self-nonsel self discrimination in a computer. *In: IEEE SYMPOSIUM ON RESEARCH IN SECURITY AND PRIVACY*, 1994, Washington. **Proceedings of the [...]** Piscataway: IEEE, 1994. p. 202-212.

FOX, N. J.; STACHOWIAK, G. W. Vegetable oil-based lubricants: a review of oxidation. **Tribology International**, Surrey, v. 40, n. 7, p. 1035-1046, 2007.

GAHR, K. H. Z. **Microstructure and wear of materials**. Amsterdam: Elsevier, 1987. 560 p. (Tribology)

GALVÃO, C. F. F.; SLAVEC, G. A.; MENARDI, P. L. de A.; GONÇALVES, A. C.; CHAVARETTE, F. R.; OUTA, R. Design and construction of a pin-on-disk experimental bench to determine the friction coefficients of materials. *In: ABCM INTERNATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING (COBEM)*, 25, 2019, Uberlândia. **Proceedings of the [...]** Uberlândia: [s. n.], 2019.

GANGULE, N. G.; DWIVEDI, M. C. Total vegetable oil greases. **Journal of Synthetic Lubrication**, Kent, v. 17, n. 4, p. 333-349, 2001.

GERDAU, A. F. P. **Manual de aços**. [S. l.: s. n.], 2003. 106 p.

GOW, G. Lubricating grease. *In: MORTIER, R. M.; FOX, M. F.; ORSZULIK, S. T. (ed.). Chemistry and technology of lubricants*. 3. ed. London: Springer, 2010. p. 411-432.

GRAND VIEW RESEARCH. **Lubricants market size, share and trends analysis report by application (industrial, automotive, marine, aerospace), by region (North America, Europe, APAC, CSA, MEA), competitive landscape, and segment forecast, 2018– 2025**. 2018. Report ID: 978-1-68038-123-8.

HEIKAL, E. K.; ELMELAWY, M. S.; KHALIL, S. A.; ELBASUNY, N. M. Manufacturing of Environment Friendly Biolubricants from Vegetable Oils. **Egyptian Journal of Petroleum**, Nasr, v. 26, n. 1, p. 53-59, 2017.

HONARY, L. A. T.; RICHTER, E. **Biobased lubricants and greases: technology and products**. New York: John Wiley & Sons, 2011. 242 p.

KHONSARI, M. M.; BOOSER, E. R. **Applied tribology: bearing design and lubrication**. 3. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2017. 657 p.

KIMURA, R. K. **Uso da técnica de análise de óleo lubrificante em motores diesel estacionários, utilizando-se misturas de biodiesel e diferentes níveis de contaminação do lubrificante**. 2010. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2010. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/94523>. Acesso em: 19 out. 2020.

KUMAR, S.; MISHRA, N. M., MUKHERJEE, P. S. Additives depletion and engine oil condition: a case Study. **Industrial lubrication and Tribology**, Droitwich, v. 57, n. 2, p. 69-72, 2005.

LAGO, D. F. **Manutenção de redutores de velocidade pela integração das técnicas preditivas de análise de vibrações e análise de óleo lubrificante**. 2007. 179 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2007. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/94548>. Acesso em: 19 out. 2020.

LARSON, M. G.; TIMPE, S. J. Effect of Load and Temperature on the Tribological Characteristics of a Steel Pin on Polyoxymethylene Disk Interface. **Journal of Tribology**, New York, v. 139, n. 051603, 2017.

LUDEMA, K. C. **Friction, wear, lubrication: a textbook in tribology**. Boca Raton: CRC-Press, 1996.

LUDEMA, K. C.; AJAYI, L. **Friction, wear, lubrication: a textbook in tribology**. 2. ed. Boca Raton: Taylor & Francis, 2018.

LUNA, F. M. T.; CAVALCANTE, J. B.; SILVA, F. O. N.; CAVALCANTE, C. L. Studies on Biodegradability of Bio-Based Lubricants. **Tribology International**, New York, v. 92, p. 301-306, 2015.

MACHINERY LUBRICATION. **Pulp and paper industry lubrication guide**. [S. l.]: Machinery Lubrication, 2020. Disponível em: <https://www.machinerylubrication.com/Read/219/debris-monitor-pdm>. Acesso em: 01 mar. 2020.

MADANHIRE, I.; MBOHWA, C. **Mitigating environmental impact of petroleum lubricants**. Switzerland: Springer International, 2016. 256 p.

MAKSIMOVA, Y. M.; SHAKHMATOVA, A. S.; ILYIN, S. O.; PAKHMANOVA, O. A.; LYADOV, A. S.; ANTONOV, S. V.; PARENAGO, O. P. Rheological and tribological properties of lubricating greases based on esters and polyurea thickeners. **Petroleum Chemistry**, Moscow, v. 58, n. 12, p. 1064-1069, 2018.

MANG, T.; DRESEL, W. **Lubricants and lubrication**. 2. ed. New York: Wiley-VCH, 2007. 850 p.

MANNEKOTE, J. K.; KAILAS, S. V.; VENKATESH, K.; KATHYAYINI, N. Environmentally friendly functional fluids from renewable and sustainable sources: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Oxford, v. 81, p. 1787-1801, 2018.

NAGENDRAMMA, P.; KAUL, S. Development of Ecofriendly/Biodegradable Lubricants: an overview. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Oxford, v. 16, n. 1, p. 764 - 774, 2012.

NAGENDRAMMA, P.; KUMAR, P. Eco-Friendly Multipurpose Lubricating Greases from Vegetable Residual Oils. **Lubricants**, Basel, v. 3, n. 4, p. 628-636, 2015.

NOBARI, A. S.; ALIABADI, M. H. F. Vibration-based techniques for damage detection and localization in engineering structures. **Computational and Experimental Methods in Structures**, London, v. 10, p. 1-39, 2018.

NORTON, R. L. **Projeto de máquinas: uma abordagem integrada**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 1028 p.

OLIVEIRA, A. F. **Síntese e caracterização de biolubrificantes obtidos através de modificações químicas no óleo de soja refinado**. 2013. 96 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental) – Departamento Acadêmico de Química e Biologia, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/1936>. Acesso em: 19 out. 2020.

OPPENHEIM, A. V.; SCHAFER, R. W. **Processamento em tempo discreto de sinais**. 3. ed. São Paulo: Person Education do Brasil, 2012. 665 p.

PUSAVEC, F.; KRAJNIK, P.; KOPAC, J. Transitioning to sustainable production – Part I: application on machining technologies. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 18, n. 2, p. 174–184, 2010.

RAMOS, D. T. L., PALLONE, E. M. J. A., PURQUERIO, B. M., FORTULAN, C. A. Projeto de um banco de ensaio de desgaste do tipo “pin-on-disc”. **Cerâmica**, São Paulo, v. 60, n. 355, p. 443–448, 2014.

RORABACHER, D. B. Statistical treatment for rejection of deviant values: critical values of dixon q parameter and related subrange ratios at the 95 percent confidence level. **Analytical Chemistry**, Washington, v. 63, n. 2, p. 139-146, 1991.

ROYLANCE, B. J.; HUNT, T. M. **The wear debris analysis handbook: machine & systems condition monitoring series**. New York: Coxmoor Publishing Company, 1999. 127 p.

SBARUFATTI, C.; MANES, A.; GIGLIO, M. Application of sensor technologies for local and distributed structural health monitoring. **Structural Control and Health Monitoring**, Oxford, v. 21, n. 7, p. 1057-1083, 2014.

SHIN, K.; HAMMOND, J. **Fundamentals of signal processing for sound and vibration engineers**. New York: John Wiley & Sons, 2008. 416 p.

SILVA, E. F. M. S. **Investigação de técnicas para o acompanhamento do desgaste de um par engrenado utilizando tribologia e análise de resposta dinâmica processada via função densidade probabilidade Beta**. 2015. 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2015. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/135997>. Acesso em: 19 out. 2020.

SILVA, C. H.; GIRALDO, D. H.; SOUZA, R. M.; SINATORA, A. Estudo da Influência das características do contra-corpo na taxa de desgaste do polioximetileno em ensaio pino-contra-disco. **Science and Technology of the Materials**, Abingdon, v. 18, p. 1-9, 2006.

SPACH OPTICS. **Custom microscope solutions**. [S. l.]: Spach Optics, 2020. Disponível em: <https://www.spachoptics.com/>. Acesso em: 01 mar. 2020.

SKOOG, D. A.; WEST, D. M.; HOLLER, F. J.; CROUCH, S. R. **Fundamentos de química analítica**. Boston: Thomson, 2006. 1026 p.

SKOOG, D. A.; WEST, D. M.; HOLLER, F. J.; CROUCH, S. R. **Fundamentals of analytical chemistry**. 9. ed. Boston: Brooks/Cole; Cengage Learning, 2014. 1090 p.

SOUZA, M. C. de; GONÇALVES, J. F. de S.; LUTIF, S. Y. S.; GOMES, J. de O. Tribological evaluation of the Jatropha and Tung-based oils as bio-lubricants on Al-7050-T7451 alloy. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, Rio de Janeiro, v. 41, n. 243, 2019.

SOTIROPOULOS, D. N.; TSIHRINTZIS, G. A. **Machine learning paradigms: artificial immune systems and their applications in software personalization**. London: Springer, 2017. 336 p. Intelligent Systems Reference Library, 118.

STOETERAU, R. L.; LEAL, L. C. **Apostila de tribologia**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.

STOICA, P.; MOSES, R. **Spectral analysis of signals**. New Jersey: Prentice Hall, 2005. 452 p.

TALIB, N.; RAHIM, E. A. The Effect of Tribology Behavior on Machining Performances When Using Bio-Based Lubricant as a Sustainable Metalworking Fluid. **Procedia CIRP**, Amsterdam, v. 40, p. 504-508, 2016.

TOMS, L. A. **Machinery oil analysis: methods, automation and benefits: a guide for maintenance managers, supervisors and technicians**. 2. ed. Virginia: Coastal Skills Training, 1995. 383 p.

YING, T. **Artificial immune system: applications in computer security**. New York: Wiley, 2016. 208 p.

YING, S.; YUPENG, Y. Temperature field analysis of pin-on-disk sliding friction test. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Oxford, v. 107, p. 339-346, 2017.

ZAINAL, N. A.; ZULKIFLI, N. W. M.; GULZAR, M.; MASJUKI, H. H. A Review on the Chemistry, Production, and Technological Potential of Bio-Based Lubricants. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Oxford, v. 82, p. 80-102, 2018.