

RESSALVA

Atendendo solicitação do autor, o texto completo desta dissertação será disponibilizado somente a partir de 21/08/2022.

**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.

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.