

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Instituto de Química - Araraquara

Vitor Bergami Sartorello

Indústria Química 4.0: Classificação de lubrificantes pelo Algoritmo de Seleção Negativa

Araraquara-SP
2024

Vitor Bergami Sartorello

Indústria Química 4.0: Classificação de lubrificantes pelo Algoritmo de Seleção Negativa

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado a Universidade Estadual
Paulista “Júlio de Mesquita Filho” como parte
dos requisitos para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Fábio Roberto Chavarette

Araraquara-SP

2024

S251i

Sartorello, Vitor Bergami

Indústria química 4.0 : classificação de lubrificantes pelo algoritmo de seleção negativa / Vitor Bergami Sartorello. -- Araraquara, 2024
76 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Química) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Química, Araraquara

Orientador: Fábio Roberto Chavarette

1. Algoritmos. 2. Lubrificante. 3. Monitoramento da integridade estrutural. 4. Processamento de sinais. 5. Tribologia. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Química, Araraquara. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

VITOR BERGAMI SARTORELLO

Indústria Química 4.0: Classificação de lubrificantes pelo Algoritmo de Seleção Negativa

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto de Química, Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho", com parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Araraquara, 01 de Julho de 2024

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **FABIO ROBERTO CHAVARETTE**
Data: 01/07/2024 11:17:48-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Fábio Roberto Chavarette
Instituto de Química, UNESP, Araraquara

Documento assinado digitalmente
 **HENRIQUE ANTONIO MENDONÇA FARIA**
Data: 01/07/2024 11:36:06-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Henrique Antonio Mendonça Faria
Instituto de Química, UNESP, Araraquara

Documento assinado digitalmente
 **GISELE DE CARVALHO APOLINÁRIO SANTOS**
Data: 01/07/2024 12:03:18-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^a. Dr^a. Gisele de Carvalho Apolinário Santos
Instituto de Química, UNESP, Araraquara

*Dedico este trabalho a toda minha
jornada durante esses anos:
experiências que vivi, pessoas
que conheci, um ciclo que chega ao fim.*

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço aos meus pais, os quais sempre estiveram do meu lado, independente dos problemas que tive durante a minha vida e procuraram me auxiliar da melhor forma, seja com dinheiro, conversas ou simplesmente um abraço.

À minha namorada, Ana Paula, a qual me ajudou nos momentos mais difíceis e ofereceu total apoio durante minha jornada toda.

À minha família, meus tios, avós, primos e meu irmão, que deixavam claro que poderia contar com eles sempre que necessário, o que sempre foi verdade.

Aos meus amigos de Araraquara, tanto quanto meus companheiros de república: Gustavo (Abaporu), Matheus (Du), Lucas Midon (Cunhado), Osmar (Charuto), Ygor (Alf), Victor (Puro-Osso), Lucas Pedro (McLovin), Henrique (Gominho), César, Gabriel (Godo), Pedro (Pamonha) e Rafael (Fuléco), quanto os meus de classe: Fábio (Sônico), Paulo (Chucrute), Ian (Ravioli), João Pedro Borin (Boris) e Rodrigo (Grande), os quais foram fundamentais em toda essa mudança de vida e cidade, sem eles teria sido árduo, não teria tão boas memórias quanto tenho agora e quero levá-los aonde puder.

Aos meus amigos da minha cidade natal (Sorocaba), Luca Okubo, Lucas Parro, João Lourenço e Bruno Larroyed, os quais apesar de distância e tempo sem conversar, nunca nos afastamos de vez, sendo amigos de longa data que sempre trouxeram alegria e ótimas memórias que só de lembrar, motivavam a continuar para poder retornar a nos encontrarmos mais e mais vezes.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Fábio Roberto Chavarette, o qual me deu a oportunidade de participar de seu projeto e estar sendo beneficiado com tanto conhecimento e novidades em questão do que estava acostumado.

Agradeço também à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) que me forneceu o privilégio de ter assistência econômica durante o período de pesquisa e que agora, orgulhosamente, apresento como trabalho de conclusão de curso.

RESUMO

Atualmente, em grande parte das máquinas industriais químicas é necessário aplicar lubrificantes, a fim de garantir o bom funcionamento sem prejudicar a estrutura interna do equipamento; na maioria das vezes, esses lubrificantes utilizados são de base mineral, o que pode acabar não sendo muito vantajoso por não serem recursos renováveis, a partir disso, torna-se importante o estudo de graxas de base vegetal, pois além de mais biodegradáveis e menos tóxicos, podem ter performances tão boas quantos os óleos minerais. A partir disso, o trabalho consiste em estudar as propriedades dos lubrificantes vegetais em comparação aos minerais em questões quanto o funcionamento e eficiência do equipamento com tais graxas e também das manutenções necessárias em função do desgaste que pode ser gerado, por meio de testes tribológicos onde serão captados sinais a partir de análises espectroquímicas nas graxas a fim de quantificar o desgaste proporcionado no equipamento e com auxílio de softwares (Octave e/ou MatLab) foi possível realizar a construção de um Algoritmo de Seleção Negativa dos lubrificantes vegetais, baseando-se nos conceitos de Monitoramento de Integridade Estrutural, o qual auxilia na determinação da vida útil e permite o equipamento durar mais tempo, por conta de manutenções preditivas, e também Sistema Imunológico Artificial (SIA), que se baseia em estudos biológicos quanto ao sistema imunológico humano para utilizar uma forma de reconhecer sinais baseado nas análises feitas nos lubrificantes vegetais e comparados com os minerais, isto é demonstrado com gráficos que demonstram o funcionamento do algoritmo, o que permite fazer a devida classificação dos lubrificantes.

Palavras-chave: Biolubrificante; Tribologia; Análise espectroquímica; Algoritmo de Seleção Negativa; Sistema Imunológico Artificial.

ABSTRACT

Nowadays, most chemical industrial machinery requires the use of lubricants in order to guarantee proper functioning without damaging the internal structure of the equipment; most of the time, these lubricants are mineral-based, which can end up not being very advantageous because they are not renewable resources, so it is important to study vegetable-based greases, because in addition to being more biodegradable and less toxic, they can perform just as well as mineral oils. Based on this, the work consists of studying the properties of vegetable lubricants in comparison to mineral lubricants in terms of the operation and efficiency of the equipment with such greases and also the maintenance required due to the wear that can be generated, through tribological tests where signals will be captured from spectrochemical analysis in the greases in order to quantify the wear provided in the equipment and with the help of software (Octave and/or MatLab) it was possible to build a Negative Selection Algorithm for vegetable lubricants, based on the concepts of Structural Integrity Monitoring, which helps determine useful life and allows the equipment to last longer, due to predictive maintenance, and also the Artificial Immune System (AIS), which is based on biological studies of the human immune system to use a way of recognizing signals based on the analyses made on vegetable lubricants and compared to mineral lubricants, this is demonstrated with graphs that show how the algorithm works, which allows the lubricants to be properly classified.

Keywords: Biolubricant; Tribology; Spectrochemical analysis; Negative selection algorithm; Artificial immune system

Lista de Figuras

1	Características gerais de um sistema tribológico.	2
2	Equipamento pino sobre disco	4
3	Monitor automático de partículas	7
4	Fluxograma do censuriamento	10
5	Fluxograma do monitoramento	10
6	Tribômetro pino sobre disco: a) Vista frontal e b) Vista lateral	12
7	Componentes eletroeletrônicos acoplados ao tribômetro	13
8	Representação e dimensões dos componentes do tribômetro	13
9	Balança analítica de precisão	14
10	Biograxas	15
11	Graxas minerais comerciais	16
12	Espectrômetro de raios X	17
13	Monitor automático de partículas	18
14	Rugosidade média das amostras exposta no rugosímetro	19
15	Dados de temperatura para os 3 ensaios de LGQ01	20
16	Espectros produzidos pela amostra LGQ01	22
17	Dados de temperatura para os 3 ensaios de LGQ02	23
18	Espectros produzidos pela amostra LGQ02	24
19	Dados de temperatura para os 3 ensaios de LGQ03	25
20	Espectros produzidos pela amostra LGQ03	27
21	Dados de temperatura para os 3 ensaios de LGQ04	27
22	Espectros produzidos pela amostra LGQ04	29
23	Dados de temperatura para os 3 ensaios de LGQ05	30
24	Espectros produzidos pela amostra LGQ05	31
25	Dados de temperatura para os 3 ensaios de LGQ06	32
26	Espectros produzidos pela amostra LGQ06	34
27	Dados de temperatura para os 3 ensaios de LGQ07	34
28	Espectros produzidos pela amostra LGQ07	36
29	Dados de temperatura para os 3 ensaios de LGQ08	37
30	Espectros produzidos pela amostra LGQ08	38
31	Dados de temperatura para os 3 ensaios de LGQ09	39
32	Espectros produzidos pela amostra LGQ09	41
33	Dados de temperatura para os 3 ensaios da Graxa Azul	41
34	Espectros produzidos pela amostra da Graxa Azul	43
35	Dados de temperatura para os 3 ensaios da Graxa Branca	44
36	Espectros produzidos pela amostra da Graxa Branca	45
37	Classificação dos sinais vibratórios	47

38	Classificação da graxa azul com a branca como própria	48
39	Classificação da graxa LGQ01 com a branca como própria	48
40	Classificação da graxa LGQ02 com a branca como própria	49
41	Classificação da graxa LGQ03 com a branca como própria	49
42	Classificação da graxa LGQ04 com a branca como própria	50
43	Classificação da graxa LGQ05 com a branca como própria	50
44	Classificação da graxa LGQ06 com a branca como própria	51
45	Classificação da graxa LGQ07 com a branca como própria	51
46	Classificação da graxa LGQ08 com a branca como própria	52
47	Classificação da graxa LGQ09 com a branca como própria	52
48	Classificação da graxa branca com a azul como própria	53
49	Classificação da graxa LGQ01 com a azul como própria	54
50	Classificação da graxa LGQ02 com a azul como própria	54
51	Classificação da graxa LGQ03 com a azul como própria	55
52	Classificação da graxa LGQ04 com a azul como própria	55
53	Classificação da graxa LGQ05 com a azul como própria	56
54	Classificação da graxa LGQ06 com a azul como própria	56
55	Classificação da graxa LGQ07 com a azul como própria	57
56	Classificação da graxa LGQ08 com a azul como própria	57
57	Classificação da graxa LGQ09 com a azul como própria	58

Lista de Tabelas

1	Parâmetros experimentais utilizados	14
2	Composição e propriedades das biograxas e graxas	16
3	Resultados de temperatura de LGQ01	20
4	Perdas de massa e volume das amostras em LGQ01	21
5	Índices PQ registrados para LGQ01	21
6	Concentrações de partículas ferrosas em LGQ01	22
7	Resultados de temperatura de LGQ02	23
8	Perdas de massa e volume das amostras em LGQ02	23
9	Índices PQ registrados para LGQ02	24
10	Concentrações de partículas ferrosas em LGQ02	24
11	Resultados de temperatura de LGQ03	25
12	Perdas de massa e volume das amostras em LGQ03	25
13	Índices PQ registrados para LGQ03	26
14	Concentrações de partículas ferrosas em LGQ03	26
15	Resultados de temperatura de LGQ04	28
16	Perdas de massa e volume das amostras em LGQ04	28
17	Índices PQ registrados para LGQ04	28
18	Concentrações de partículas ferrosas em LGQ04	29
19	Resultados de temperatura de LGQ05	29
20	Perdas de massa e volume das amostras em LGQ05	30
21	Índices PQ registrados para LGQ05	31
22	Concentrações de partículas ferrosas em LGQ05	31
23	Resultados de temperatura de LGQ06	32
24	Perdas de massa e volume das amostras em LGQ06	32
25	Índices PQ registrados para LGQ06	33
26	Concentrações de partículas ferrosas em LGQ06	33
27	Resultados de temperatura de LGQ07	35
28	Perdas de massa e volume das amostras em LGQ07	35
29	Índices PQ registrados para LGQ07	35
30	Concentrações de partículas ferrosas em LGQ07	36
31	Resultados de temperatura de LGQ08	37
32	Perdas de massa e volume das amostras em LGQ08	37
33	Índices PQ registrados para LGQ08	38
34	Concentrações de partículas ferrosas em LGQ08	38
35	Resultados de temperatura de LGQ09	39
36	Perdas de massa e volume das amostras em LGQ09	39
37	Índices PQ registrados para LGQ09	40

38	Concentrações de partículas ferrosas em LGQ09	40
39	Resultados de temperatura da Graxa Azul	42
40	Perdas de massa e volume das amostras na Graxa Azul	42
41	Índices PQ registrados para a Graxa Azul	42
42	Concentrações de partículas ferrosas na Graxa Azul	43
43	Resultados de temperatura da Graxa Branca	43
44	Perdas de massa e volume das amostras na Graxa Branca	44
45	Índices PQ registrados para a Graxa Branca	45
46	Concentrações de partículas ferrosas na Graxa Branca	45
47	Comparação dos resultados das graxas	46

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Tribologia	1
1.1.1	Ensaio tribológico	2
1.2	Lubrificação	4
1.2.1	Óleos Lubrificantes	5
1.2.2	Graxas Lubrificantes	5
1.3	Análises do desgaste gerado	6
1.4	Técnicas Analíticas	6
1.4.1	Ferrografia	6
1.4.2	Espectroscopia	7
1.5	Monitoramento de Integridade Estrutural	8
1.6	Sistema Imunológico Artificial	9
1.6.1	Algoritmo de Seleção Negativa	9
2	Objetivos	11
2.1	Organização do Trabalho	11
3	Materiais e métodos	12
3.1	Bancada Experimental	12
3.2	Parâmetros do Experimento	14
3.3	Ensaio	15
3.4	Aquisição de Dados	17
3.4.1	Medidas de desgaste	17
3.4.2	Espectrômetro	17
3.4.3	Monitor Automático de Partículas	18
4	Resultados	19
4.1	Pré-ensaio	19
4.2	Lubrificantes Vegetais	20
4.2.1	LGQ01	20
4.2.2	LGQ02	23
4.2.3	LGQ03	25
4.2.4	LGQ04	27
4.2.5	LGQ05	29
4.2.6	LGQ06	32
4.2.7	LGQ07	34
4.2.8	LGQ08	36
4.2.9	LGQ09	39

4.3	Lubrificantes Minerais	41
4.3.1	Graxa Azul (FAG multiuso)	41
4.3.2	Graxa Branca (Yourlub)	43
4.4	Comparação	46
4.5	Análise Artificial de Seleção Negativa	47
5	Conclusão	59
5.1	Dificuldades Encontradas	59
6	Referências Bibliográficas	60

1 Introdução

Conforme a tecnologia avançou ao longo da história, as preocupações quanto ao meio ambiente tornaram-se crescentes, ou seja, mais políticas e regulamentações ambientais foram implantadas, a fim de incentivar um futuro mais sustentável e energeticamente viável, já que atualmente grande parte dos produtos usados e da energia utilizada provém de recursos não renováveis, provocando um esgotamento dessas fontes a longo prazo.

Visto que, as indústrias vem se aprimorando e se modificando, onde cada vez mais os processos se automatizam através de sensores e sistemas virtuais, denominadas como Indústria 4.0, dessa forma, é possível armazenar dados a fim de poder analisar e testar diferentes métodos para realizar as operações com recursos renováveis, os quais, além de conseguir diminuir os danos ambientais podem se mostrar tão eficazes e reprodutíveis quanto os derivados do petróleo e afins.

A partir disto, torna-se indispensável a procura por substituir o petróleo por recursos mais viáveis e que não se esgotem com o tempo, combustíveis como biodiesel e bioetanol já vem sendo aceitos no mundo por terem vantagens e também proporcionam um caminho para a independência energética dos combustíveis fósseis. Agora, o que se espera é substituir os lubrificantes de origem mineral por origem vegetal, contudo isto não é tão simples, visto que, apesar de ambientalmente serem mais sustentáveis, não necessariamente apresentam um desempenho tão bom quanto os derivados de petróleo, então é necessário estudar seu comportamento e fazer mudanças químicas para melhorar a performance e manter as características biodegradáveis para um descarte facilitado.

Portanto, faz-se necessário um método de avaliar os óleos lubrificantes de acordo com suas características tribológicas armazenando num banco de dados e no futuro classificá-los de acordo com sua eficiência em comparação com os de origem mineral, baseando-se em conceitos de Monitoramento de Integridade Estrutural para que não haja um desgaste interno do equipamento com mais rapidez.

1.1 Tribologia

A tribologia é a área que estuda superfícies interativas a fim de compreender o comportamento do movimento de acordo com a fricção, desgaste e/ou lubrificação envolvidos. Assim para compreender melhor como funciona um sistema a ser estudado, pode-se separá-lo em estresse coletivo e estrutura do sistema, os quais significam, respectivamente os parâmetros de carga técnica e física (carga, velocidade de deslizamento e tempo envolvidos) e como a estrutura em si, ou seja a base a sofrer o estresse, corpo oposto, ambiente e o meio intermediário (lubrificante) (CZICHOS et al., 2010; MANG, 2014).

Quando se analisa um sistema tribológico, os principais objetivos são maximizar as saídas funcionais e minimizar as de perda, as quais podem ser exemplificadas na Figura 1:

A partir disto, cabe entender quais fatores que podem influenciar no desgaste, para

Figura 1: Características gerais de um sistema tribológico.



Fonte: Abecom, 2021.

poder analisar como melhorar a performance. Eles são divididos em estruturais, interfaciais e ambientais:

1. Estruturais: propriedades materiais como dureza, composição, capacidade de aderência, quão deformável é e também propriedades geométricas como o formato, topografia, rugosidade superficial e dimensões.
2. Interfaciais: podendo ser por fluidos ou sólidos, assim dependendo do tipo do lubrificante, sua composição, umidade e entre outros.
3. Ambientais: são características do próprio ambiente como a umidade, temperatura e contaminantes.

Assim, por meio de ensaios variando esses parâmetros é possível avaliar como minimizar o desgaste e o atrito envolvido e também selecionar a interface que trará melhor funcionamento.

1.1.1 Ensaio tribológico

Os testes tribológicos são indispensáveis na indústria, pois além de ser possível ver a performance e tempo de duração da interface a ser usada, pode evitar frequentes manutenções e até analisar propriedades de novos materiais da engenharia como os polímeros e cerâmicas. (SILVA et al., 2006; LARSON et al. 2017).

Os ensaios tribológicos concedem a descrição comportamental do sistema sob situações controladas, de forma que simule uma forma de desgaste particular, dessa forma testando para diferentes parâmetros, é possível obter dados e dessa forma selecionar o melhor lubrificante a se aplicar.

Para esses ensaios, é necessário utilizar um tribômetro, equipamento que deixa duas superfícies em contato e se decide as condições como velocidade, pressão aplicada e a interface. A partir disso, eles conseguem medir o atrito envolvido e observar o comportamento.

Cada tipo de tribômetro estuda um desgaste diferente, pois mudam a forma em que as duas superfícies se desgastam. Entre eles existem alguns exemplos como:

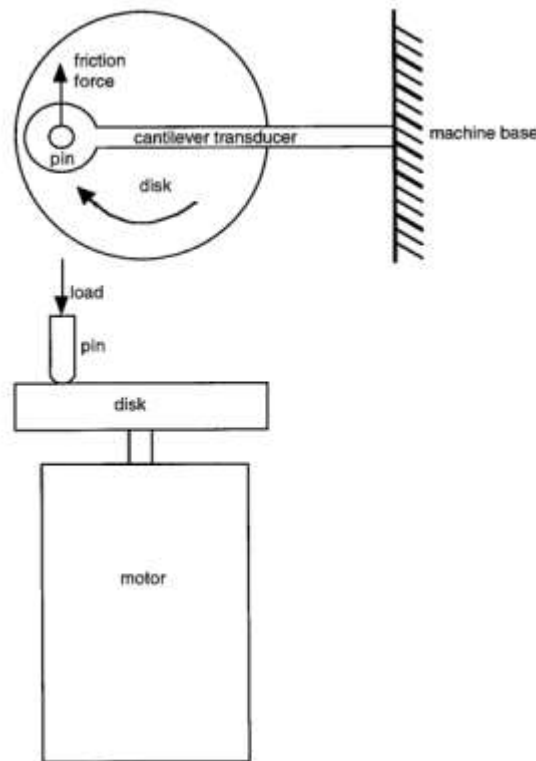
1. Pino/esfera sobre disco: desgaste rotacional e recíproco;
2. Pino linear: desgaste linear recíproco;
3. Bloco e anel: desgaste por deslizamento;

Apesar de serem diferentes instrumentos e analisarem diferentes tipos de movimento, ambos podem medir o coeficiente de atrito envolvido, já que o sistema permite calcular a força envolvida (BHUSHAN, 2000).

Entre eles, o mais comumente utilizado e mais referenciado para estudar o atrito é o do tipo pino/esfera sobre disco (pin/ball on disk), pois consegue avaliar com precisão o comportamento do desgaste entre os corpos em contato e tem uma reprodutibilidade fácil em laboratório (BAYER, 2004; RAMOS et al., 2014).

Na Figura 2 são demonstrados os componentes e estrutura da máquina.

Figura 2: Equipamento pino sobre disco



Fonte: BHUSHAN, 2000.

Para o equipamento, segundo a norma americana ASTM G99: *Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus*, deve-se decidir parâmetros como a força, velocidade, distância percorrida de um sobre o outro e temperatura do pino e/ou disco, além de ser preciso ver as condições ambientais como a temperatura do local do ensaio, umidade e até o tipo do lubrificante.

1.2 Lubrificação

Em qualquer processo que envolva movimento, existe uma força contrária que impede que o objeto se desloque infinitamente a partir da aplicação de uma força num certo sentido, essa força contrária é o atrito, onde cada superfície que esse corpo está sendo movimentado proporciona uma resistência diferente.

Assim, a partir desse conceito, a lubrificação é considerado como o processo que diminui o atrito envolvido, sendo um lubrificante qualquer tipo de substância que tenha essa capacidade, independente do estado físico (KHONSARI; BOOSER, 2017).

A principal função deles quanto a aplicações em máquina é diminuir o desgaste gerado pelo movimento entre as peças, além de facilitar essa movimentação, dessa forma, a vida útil desses equipamentos é aumentada, evitando um excesso de manutenções e até podendo aumentar a eficiência da operação.

Contudo, para haver esse aumento no desempenho, existem fatores como a origem do óleo lubrificante, sua composição química, aditivos acrescentado e até o balanceamento da fórmula, mesmo assim a garantia de uma eficiência maior só é vista quando aplicada em prática, os ensaios permitem ter uma noção, mas não garantem o sucesso total ao serem incorporados (CARRETEIRO; BELMIRO, 2006).

1.2.1 Óleos Lubrificantes

Os óleos são os lubrificantes líquidos, compostos por óleos e produtos químicos que pretendem melhorar a performance de tal. É importante manter um controle quanto ao óleo para observar suas propriedades físico-químicas ao longo do tempo como acidez, umidade e principalmente a viscosidade, pois esta não pode ter valores muito altos nem baixos, já que, altas causam um aumento de temperatura e dificultam o movimento e baixas provocam um aumento no atrito aumentando contato entre as peças (KUMAR et al., 2005; ZAINAL et al., 2018).

1.2.2 Graxas Lubrificantes

Assim como os óleos, as graxas são do tipo mais usados, tendo uma consistência pastosa, contudo traz mais funções além da lubrificação em si, podendo servir como vedação, amortecedor, supridor de ruído e também como inibidor de corrosão (GOW, 2010).

Segundo Carreteiro e Belmiro (2006) podem ser definidas como uma mistura entre um fluido lubrificante e um espessante para obter um produto homogêneo semi-sólido com boas propriedades lubrificantes. Na prática também há aditivos a fim de melhorar a performance.

Para sua fabricação, geralmente, é utilizado o processo de saponificação onde o sabão formado é misturado com o óleo ou dissolvido no mesmo, contudo existem 3 tipos: simples, as quais a base são sabão; complexas, que são similares as simples, mas incorporam um sal como agente complexante e também as sem sabão, as quais conseguem resistir melhor a temperaturas extremas.

Sua estrutura, é como se fosse uma espécie de absorvente que se adere ao fluido, que impede que o mesmo escape ou que contaminantes entrem, dessa forma permite um bom desempenho na lubrificação.

Por se tratarem de semi-sólidos, as graxas não tem viscosidade, assim as principais propriedades dela são o número de consistência NLGI e o ponto de gota, o primeiro é definido a partir de sua consistência e se observa a partir da facilidade de penetração na graxa, classificando-as de 000 a 6, onde 000 é a menos espessa e a 6 a mais; já o segundo se refere a quando se forma a primeira gota no material pastoso, indicando uma mudança de estado pastoso para líquido, ela que limita a temperatura de operação da graxa.

1.3 Análises do desgaste gerado

Para estudar a efetividade do lubrificante é necessário analisá-lo após os testes tribológicos e observar o quão contaminado ficou com partículas sólidas gerados pelo contato entre peças, assim observando o tamanho e material delas, podendo revelar um mau funcionamento e, dependendo, até a origem do problema (ARATO JÚNIOR, 2004). Por ser o meio interfacial entre o contato, estudar a concentração dessas partículas este procedimento analítico é o mais eficaz para encontrar a anomalia.

Por meio das dimensões das partículas é possível separar em tipos de desgaste, a classificação é feita entre desgaste normal, acentuado, avançado ou catastrófico. Feita da seguinte forma:

- Desgaste normal: partículas menores que 10 μm e sua distribuição geral é entre 0,1 e 1,0 μm
- Desgaste acentuado: partículas menores que 100 μm e e sua distribuição geral é entre 0,1 e 10 μm
- Desgaste avançado: partículas passam a ter maior concentração na faixa de 100 μm
- Desgaste catastrófico: partículas passam a ter maior concentração entre 100 e 1000 μm , representando um defeito definitivamente.

O formato das partículas também pode revelar informações quanto ao tipo de desgaste, porém é uma análise mais qualitativa, não sendo tão interessante para os testes, já que o tamanho fornece bons resultados.

Assim, é possível por meio do estudo dessas partículas dispersas no lubrificante identificar os desgastes entre os componentes e permite procurar a origem desse problema, na tentativa de resolvê-lo.

1.4 Técnicas Analíticas

A eficácia das análises baseia-se na quantificação e a observação dos fragmentos ferrosos por meio de instrumentação adequada para sensoriamento magnético ou filtragem para poder medir a concentração dos corpúsculos de desgaste (TOMS, 1995).

Agora, serão descritos os métodos utilizados para analisar os particulados de desgaste, dentre eles: a ferrografia, a filtragem por membrana e a espectroscopia.

1.4.1 Ferrografia

A ferrografia é uma das técnicas para analisar partículas, onde consiste determinar o tipo de desgaste, além de sua origem, por meio dos tamanhos, cores e naturezas específicas dos sólidos particulados.

Pode ser feita de forma quantitativa, onde o foco é quantificar a concentração de particulados em suspensão no lubrificante ou de forma analítica, onde a observação quanto à morfologia é o principal foco.

A quantitativa ou de leitura direta, quantifica o tamanho e número de partículas ferrosas a fim de adquirir informações sobre a severidade do desgaste e também construir gráficos de tendência.

Esse método, de forma rápida e prática classifica as partículas em grandes ou pequenas, usando como partida 5 μm , ou seja, menores que 5 μm são pequenas e as grandes são maiores. A instrumentação utilizada é o monitor automático de partículas, o qual examina o analito por um campo magnético induzido para ver a presença de material ferromagnético.

Figura 3: Monitor automático de partículas



Fonte: OELCHECK.

A analítica, apesar da sua importância, não foi focada no experimento, utilizou-se mais da parte quantitativa para as análises.

1.4.2 Espectroscopia

Nesse tipo de técnica utiliza-se da interação entre a radiação com a matéria, dessa forma pode revelar a composição química do material a partir do espectro formado, baseando-se nas regiões espectrais em raios gama, X e ultravioleta, visível, infravermelho, microondas ou radiofrequência. A análise é feita pela radiação produzida ou absorvida pela amostra.

Por meio de estímulos energéticos, fazem os átomos do analito se ionizarem, por estarem num estado mais energético, assim cada elemento emite uma radiação ao buscar uma maior estabilidade retornando ao estado fundamental, permitindo sua identificação e até sua proporção (SKOOG et al., 2006, 2014).

Quando é um lubrificante que é analisado, é possível localizar quais peças estão sofrendo maior desgaste, vendo se há uma concentração maior de algum metal específico

da qual o componente é fabricado (TOMS, 1995).

1.5 Monitoramento de Integridade Estrutural

Diversas estruturas presentes no nosso dia a dia, tais como pontes, prédios ou outros tipos de plantas industriais tem papel fundamental na sociedade, seja para locomoção, moradia ou até mesmo geração de energia. Por isso é importante manter essas estruturas íntegras, a fim de evitar desmoronamentos ou quebras de partes, dessa forma, vem o conceito de monitoramento de integridade estrutural (MIE), para poder verificar a "saúde" dessas estruturas e evitar gastos maiores com manutenções ou até catástrofes dependendo da dimensão tratada (SBARUFATTI; MANES; GIGLIO, 2014).

Este é o nome dado à estratégia usada para detectar e prevenir danos nas áreas de engenharia civil, mecânica e aeroespacial (FARRAR; WORDEN, 2007; FIGUEIREDO et al., 2011), sendo um dos métodos mais eficientes para gerenciar as estruturas (NOBARI; ALIABADI, 2018).

Para realizar a identificação do dano, a primeira etapa consiste na sua detecção por meio de mudanças nas propriedades físicas da estrutura, como massa, fator de amortecimento e sua frequência natural. Após detectado é realizado o diagnóstico, quando são analisados o local e tipo de severidade do dano. Por fim, ocorre o prognóstico tenta prever o comportamento e alertar quanto à sua vida útil (FARRAR; WORDEN, 2007; FIGUEIREDO et al., 2011).

O conceito de MIE se baseia em reconhecimento de padrão estatístico, em que os algoritmos de aprendizagem são fundamentais para entender o comportamento das estruturas por meio de experiências (testes passados), como se fosse um cérebro, podendo analisar diversos dados e reconhecer um padrão que demonstre o dano (FIGUEIREDO et al., 2011).

Segundo Figueiredo et al. (2011), o MIE é dividido em 4 estágios:

1. Avaliação Operacional
2. Aquisição de Dados
3. Extração de Características
4. Modelo Estatístico para definir as Características

Por isso, o MIE envolve a análise por um longo período de tempo, onde as respostas são analisadas por sensores que fornecem os dados, permitindo extrair as características dos possíveis danos e fornecendo a condição atual da integridade estrutural através de uma análise estatística dos dados coletados (FIGUEIREDO; MOLDOVAN; MARQUES, 2013).

No experimento aplicou-se um modelo de aprendizagem para entender o comportamento do tribômetro como estrutura dinâmica junto com os lubrificantes, usando os princípios de sistema imunológico para reconhecer padrões e identificar danos.

1.6 Sistema Imunológico Artificial

Desde a metade do século XX, muitas pesquisas procuraram estudar simular sistemas biológicos, baseando-se em, principalmente estruturas e funções de seres humanos (YING TAN, 2016). Por conta disso, o Sistema Imunológico Biológico (SIB) tornou-se emergente para pesquisas em bioinformática, já que mecanismos que imitam os mecanismos de defesa do corpo humano, buscando teorias e conceitos capazes de trazer algoritmos computacionais para solucionar problemas reais (CASTRO, 2001; YING TAN, 2016).

O SIB é um mecanismo complexo para defender o organismo contra agentes patógenos infecciosos. Assim para garantir esta proteção deve ser capaz de distinguir as células do próprio corpo, os próprios, dos antígenos invasores, os não-próprios. Isto atraiu muitos desenvolvedores de sistemas procuraram trazer modelos que repliquem o sistema imunológico com programação, este termo é conhecido com Sistema Imunológico Artificial (CASTRO, 2001; YING TAN, 2016).

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. Pode-se citar: reconhecimento, diversidade, aprendizado, memória e adaptação.

Existem diversos algoritmos e modelos imunes em SIAs, entre eles há o algoritmo de seleção negativa, o qual recebe enfoque nesta pesquisa por sua aplicação utilizada.

1.6.1 Algoritmo de Seleção Negativa

O mecanismo de seleção negativa foi o primeiro dentre os outros do sistema imunológico a ser explorado para desenvolver um SIA (SOTIROPOULOS; TSIHRINTZIS, 2017). Sua inspiração foi baseada no mecanismo de defesa das células T no timo no SIB com discriminação de sinal próprio-não-próprio (DASGUPTA, 1999).

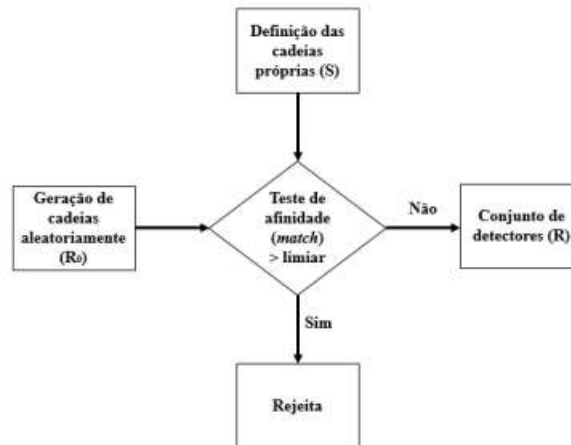
O algoritmo precisa ter a capacidade de distinguir os elementos que não fazem parte do sistema, portanto saber diferenciar os elementos próprios e não-próprios do sistema. Ele precisa ser executado em duas etapas, seu treinamento e seu teste (DASGUPTA, 1999; CASTRO, 2001; YING TAN, 2016; SOTIROPOULOS; TSIHRINTZIS, 2017).

A primeira fase pode ser conhecida também como censuriamento e nesta são identificados os detectores que não conseguem encontrar cadeias próprias, para isso é necessário, primeiramente, definir as cadeias próprias do processo, as quais são protegidas, assim, geram-se cadeias aleatórias para avaliar sua afinidade (*match*) com esse conjunto próprio e depois caso haja uma afinidade maior que o limite pré-estabelecido é reconhecida como própria e ela é rejeitada, se for menor que o limite a cadeia é armazenada num conjunto de detectores (CASTRO, 2001; SOTIROPOULOS; TSIHRINTZIS, 2017).

A segunda fase também conhecida como monitoramento, onde o conjunto de detectores armazenado na primeira etapa é utilizado para reavaliar o match e detectar o que não é próprio (CASTRO, 2001; SOTIROPOULOS; TSIHRINTZIS, 2017).

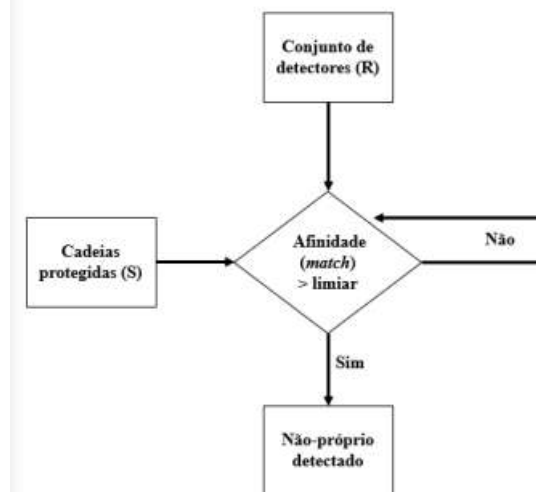
A seguir, são retratados fluxogramas que exemplicam as etapas do algoritmo, respectivamente, o censoriamento e o monitoramento, Figuras 4 e 5:

Figura 4: Fluxograma do censoriamento



Fonte: Adaptado de Sotiropoulos e Tsihrintzis (2017).

Figura 5: Fluxograma do monitoramento



Fonte: Adaptado de Sotiropoulos e Tsihrintzis (2017).

2 Objetivos

O principal objetivo do trabalho é poder analisar o comportamento de deferentes lubrificantes vegetais por meio da coleta de dados experimentais, para assim poder comparar com dois exemplos de lubrificantes minerais, dessa forma, podendo criar um sistema de classificação para verificar a eficiência, performance e desgaste de cada um em comparação ao que seria um "comportamento ideal".

Além disso, realizar a construção de um algoritmo capaz de captar os sinais obtidos experimentalmente e poder classificar as graxas de forma robusta e facilitada, demonstrando rapidamente se as graxas comparadas terão boa vida útil e se são eficazes no momento de evitar atrito entre as peças.

2.1 Organização do Trabalho

Este trabalho é dividido em 3 principais partes. A primeira parte foi a introdução, a qual refere-se a revisão bibliográfica da tribologia, dos lubrificantes vegetais, análises utilizadas para adquirir os sinais, explicações sobre o algoritmo de seleção negativa em conjunto com os conceitos de sistema imunológico artificial, facilitando assim a compreensão e entendimento do trabalho como um todo.

A segunda parte é quanto ao capítulo 3, que fala a respeito da montagem da bancada experimental em si, os materiais utilizados em cada etapa e também a explicação em relação a toda instrumentação utilizada para as análises para desgaste, acúmulo de material, entre outras.

A última parte, o capítulo 4, refere-se às análises químicas feitas com cada uma das biograxas e também as comerciais, assim como seus sinais adquiridos, a apresentação dos resultados em formas de gráfico e também a comparação feita a partir do algoritmo de forma classificatória dos lubrificantes em relação a cada um dos dois lubrificantes minerais usados de exemplo.

3 Materiais e métodos

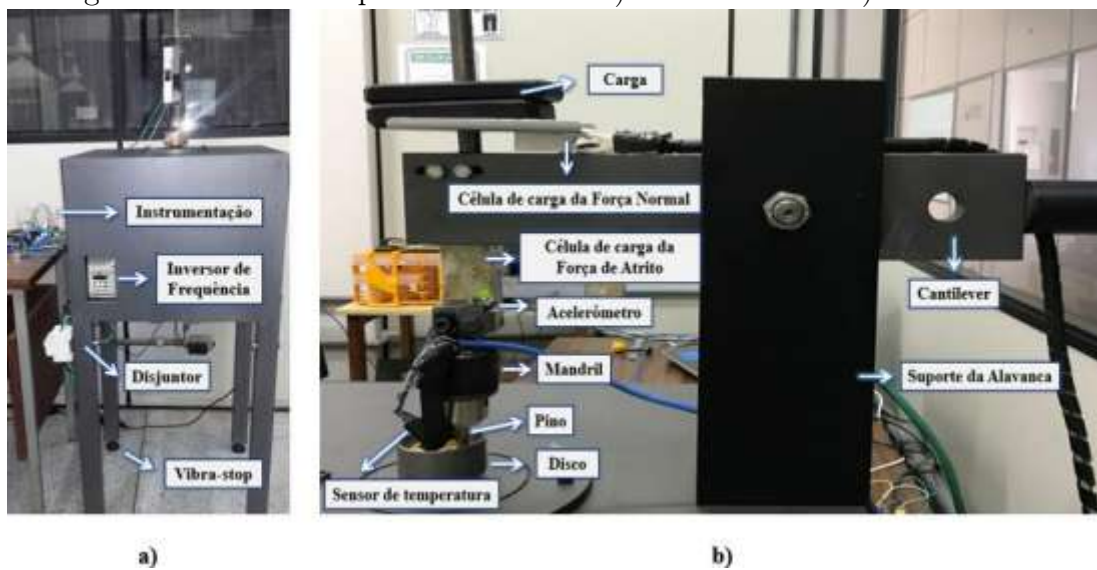
Nesse capítulo são descritos a montagem e os componentes da bancada experimental, assim como a metodologia utilizada para fazer o experimento.

3.1 Bancada Experimental

A bancada foi separada em 2 partes: o tribômetro tipo pin-on-disk em si e os componentes elétricos e eletrônicos a fim de captar os sinais e depois conseguir utilizá-los para poder comparar as biograxas.

A seguir, ilustra-se o tribômetro usado no experimento mostrando sua vista frontal e lateral:

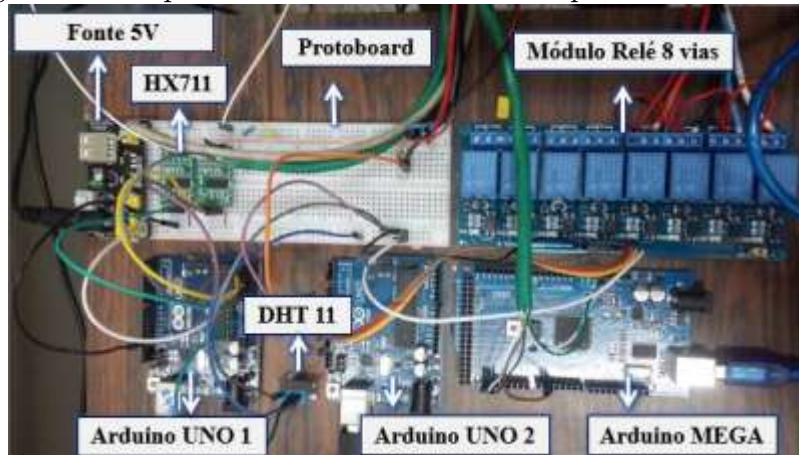
Figura 6: Tribômetro pino sobre disco: a) Vista frontal e b) Vista lateral



Fonte: Adaptação de Galvão et al., 2019.

Por seguinte, apresenta-se os componentes eletroeletrônicos do experimento usados na instrumentação, eles demonstram um custo baixo, por conta de suas peças, controlados através de uma plataforma com código aberto por Arduino:

Figura 7: Componentes eletroeletrônicos acoplados ao tribômetro



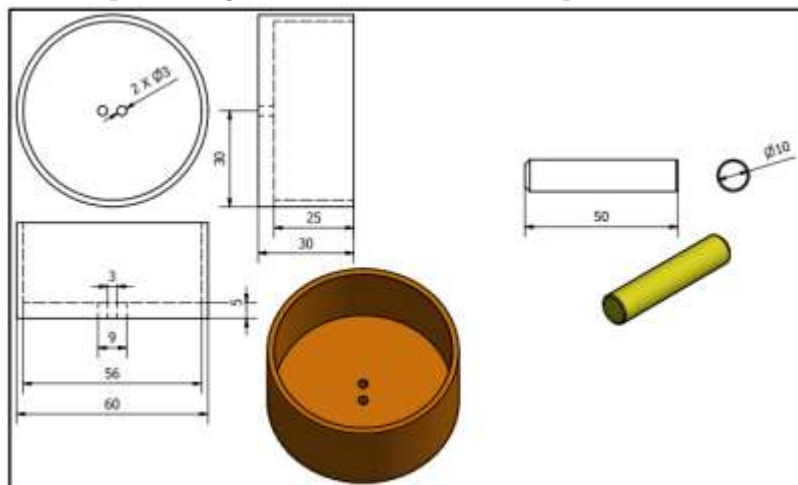
Fonte: Adaptação de Galvão et al., 2019.

Foram usados um microcontrolador do tipo Arduino UNO, um inversor de frequência, um sensor infravermelho reflexivo do tipo E18 - D80NK, um disjuntor e um módulo relé de 8 vias em que só 4 são usadas, numa fonte de 5V.

Para analisar as forças de atrito e normal foi usado um outro Arduino UNO, duas células de carga e 2 conversores HX711. Para os dados de temperatura e pressão, usou-se os sensores DHT11 e o IR MLX90614. Já para captar os sinais vibratórios, um acelerômetro do tipo MPU6050 e um Arduino MEGA.

Tanto o pino quanto o disco do tribômetro são feitos com aço SAE 1040, com densidade de $7,845 \text{ g/cm}^3$. O pino tem 10 mm de diâmetro e 50mm de comprimento, já o disco tem 56 mm de diâmetro e 5 mm de espessura. As peças e dimensões foram esquematizadas, apresentadas na Figura 8:

Figura 8: Representação e dimensões dos componentes do tribômetro



Fonte: O próprio autor.

Para melhorar as imperfeições da superfície das peças usou-se uma lixadeira com granulação de 100 a 1500 e após isso mediu-se a rugosidade através de um rugosímetro

para notar a eficiência da operação. Após isto, as amostras tiveram sua massa determinada por uma balança analítica de precisão, a qual tem capacidade de medir até 4 casas decimais, mostrada na Figura 9:

Figura 9: Balança analítica de precisão



Fonte: O próprio autor.

3.2 Parâmetros do Experimento

Os parâmetros decididos para uma análise comparativa com os mesmos dados estão apresentados na Tabela 1, sendo que para cada lubrificante testado, realizou-se o ensaio em triplicata:

Tabela 1: Parâmetros experimentais utilizados

Parâmetros	Valores
Distância (m)	1000
Velocidade rotativa (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
Massa lubrificante (g)	5

Fonte: O próprio autor.

A frequência do sistema foi de 1 Hz, assim a cada ciclo dele representa a captação de um sinal da vibração, além do controle das propriedades segundo a distância percorrida

do pino sobre o disco.

3.3 Ensaios

Para a realização dos ensaios, em primeiro lugar os componentes do tribômetro são higienizados com etanol e são secados, a fim de retirar as impurezas ou agentes contaminantes para garantir maior exatidão nos resultados experimentais.

No caso dos lubrificantes utilizados, as biograxas, feitas a partir do óleo de soja, têm 9 tipos (LGQ01 à LGQ09), sendo que 3 foram sintetizadas à base de sódio e 6 à base de lítio, onde as proporções foram feitas com 10, 20 e 30 %, no caso, houveram dois processos de produção, enquanto as com base sódica (LGQ01 à LGQ03) e 3 à base de lítio (LGQ07 à LGQ09) foram feitas com a saponificação direta do bio-óleo, já as outras 3 restantes à base de lítio foram feitas a partir da mistura do sabão com o óleo (LGQ04 à LGQ06).

Também usou-se os lubrificantes comerciais com base mineral para fins comparativos, havendo 2 amostras diferentes: a graxa azul FAG multiuso, a qual a base é o lítio e também a graxa branca Yourlub, que tem base cálcica e de óxido de titânio.

A seguir nas Figuras 10 e 11, são apresentadas as biograxas e as graxas comerciais:

Figura 10: Biograxas



Fonte: O próprio autor.

Figura 11: Graxas minerais comerciais



Fonte: O próprio autor.

Os dados específicos de cada biograxa estão apresentados na Tabela 2, demonstrando suas propriedades:

Tabela 2: Composição e propriedades das biograxas e graxas

Graxas	Composição	Ponto de Gota ($^{\circ}\text{C}$)	NLGI
LGQ01	Sódio 10% (saponificação)	103	0
LGQ02	Sódio 20% (saponificação)	118	1
LGQ03	Sódio 30% (saponificação)	149	2
LGQ04	Lítio 10% (mistura)	144	2
LGQ05	Lítio 20% (mistura)	161	3
LGQ06	Lítio 30% (mistura)	173	3
LGQ07	Lítio 10% (saponificação)	133	0
LGQ08	Lítio 20% (saponificação)	156	0
LGQ09	Lítio 30% (saponificação)	165	1
Azul	Lítio 7 - 10%	201	2
Branca	Cálcio 8 - 10%	105	2

Fonte: O próprio autor.

3.4 Aquisição de Dados

Os dados foram adquiridos através dos microcontroladores de acordo com a vibração que o sistema gerava, assim como pelas análises feitas após para verificar o grau de desgaste de acordo com a concentração de partículas no lubrificante.

3.4.1 Medidas de desgaste

O desgaste foi quantificado por meio da perda de massa e volume das peças, uma vez que se tem os dados da densidade do material delas:

$$V_p = \frac{m_p}{\rho} \quad (1)$$

Onde V_p é o volume perdido, m_p , é a massa perdida e ρ é a densidade do material.

3.4.2 Espectrômetro

Por meio da técnica de espectroscopia é possível identificar os elementos químicos nas amostras de lubrificantes e suas concentrações, usou-se um espectrômetro de raios X para empregar a radiação eletromagnética para ionizar.

O utilizado nos ensaios é ilustrado na Figura 12 a seguir:

Figura 12: Espectrômetro de raios X



Fonte: O próprio autor.

As amostras para serem analisadas pelo equipamento foram diluídas 1 g de amostra em 20 mL do solvente orgânico, hexano e após homogeneizada a diluição, é posta no aparelho para a análise. Reaproveita-se a solução para a análise por filtragem e para o monitor automático.

3.4.3 Monitor Automático de Partículas

Para contabilizar as partículas ferromagnéticas usou-se o monitor automático de partículas, o qual ao introduzir o analito que passou pelos ensaios, gerará uma distorção no campo magnético do equipamento, o que provoca um sinal que consegue ser exibido como um número, chamado índice PQ, o qual tem relação com a massa dos particulados envolvidos.

O utilizado está representado na Figura 13:

Figura 13: Monitor automático de partículas



Fonte: O próprio autor.

O instrumento necessita calibração antes de ser usado, após feitas, as soluções dos lubrificantes são colocada num recipiente específico e alojadas no carrossel. Para garantir maior precisão na medição, são feitas 10 repetições e usa-se a média dos valores.

4 Resultados

Nesta seção serão apresentadas as análises feitas com cada uma das amostras, assim como os resultados que podem ser obtidos pelas mesmas e também uma comparação a partir do algoritmo de seleção negativa usando as duas graxas comerciais.

4.1 Pré-ensaio

Como dito anteriormente, após lixar as peças, é necessário medir a rugosidade através do rugosímetro e segundo a norma ASTM G99 (2017), para fazer os ensaios é necessário que a média da rugosidade superficial seja menor que $0,1 \mu\text{m}$, quando testados após o lixamento, a rugosidade média foi de $0,08 \pm 0,01 \mu\text{m}$, assim como mostrado na Figura 14:

Figura 14: Rugosidade média das amostras exposta no rugosímetro



Fonte: O próprio autor.

As massas das amostras foram medidas antes dos ensaios, mas são feitas medidas após também para medir a perda de massa e volume.

Os dados de temperatura do contato entre as superfícies e as quantificações de desgaste por meio das perdas de massa e volume de cada lubrificante são mostrados com detalhes, além das análises com o monitor automático e o espectrômetro, demonstrando as concentrações de partículas e facilitando a comparação.

4.2 Lubrificantes Vegetais

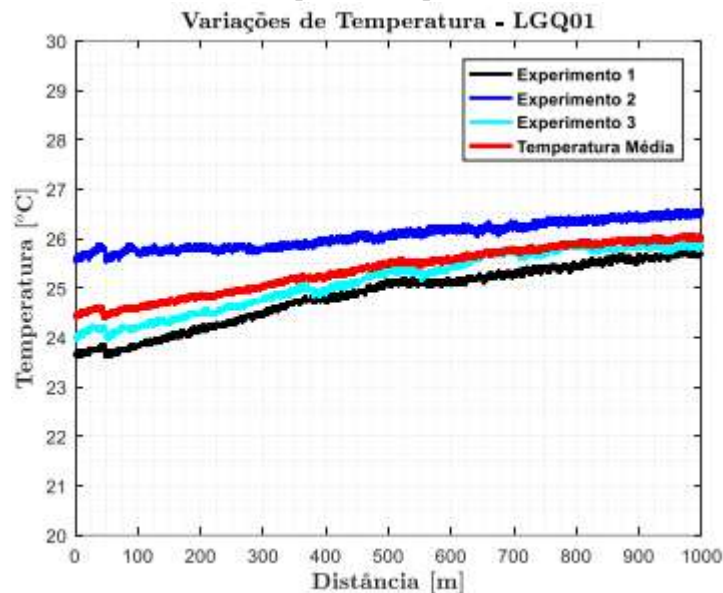
Por meio dos ensaios feitos em triplicata com cada lubrificante apresentou-se seus dados de temperatura, perdas de massa e volume, concentrações e tipos dos particulados magnéticos, assim como os índices expressos pelo monitor automático de partículas.

Os microcontroladores e sensores foram os responsáveis por adquirir e armazenar os dados de em cada repetição dos testes e eles foram tratados com o software Octave.

4.2.1 LGQ01

O sensor de temperatura permitiu a captação dos dados de temperatura conforme a distância percorrida pelo pino, assim sendo possível montar um gráfico para observar o comportamento, representado na Figura 15:

Figura 15: Dados de temperatura para os 3 ensaios de LGQ01



Fonte: o próprio autor.

Para organizar os dados, foi necessário tabelá-los registrando temperatura máxima e mínima e observar a variação entre elas para analisar a elevação da temperatura para os ensaios, registrando também as médias. Assim está na Tabela 3:

Tabela 3: Resultados de temperatura de LGQ01

Ensaio	Temperaturas		
	Tmáx (°C)	Tmín (°C)	ΔT (°C)
1	25,87	23,63	2,24
2	26,61	25,53	1,08
3	25,95	23,95	2,00
Média	26,08	24,39	1,69

Fonte: O próprio autor.

Como dita, foram medidas as massas antes e após e a partir da Equação 1 calculou-se a perda de volume considerando a densidade do aço SAE 1040 de $7,845 \text{ g/cm}^3$, representados na Tabela 4:

Tabela 4: Perdas de massa e volume das amostras em LGQ01

Ensaio	Pino		Disco	
	$m_p \text{ (g)}$	$V_p \text{ (mm}^3\text{)}$	$m_p \text{ (g)}$	$V_p \text{ (mm}^3\text{)}$
1	0,0001	$1,27 \cdot E-2$	0,0004	$5,10 \cdot E-2$
2	0,0004	$5,10 \cdot E-2$	0,0004	$5,10 \cdot E-2$
3	0,0001	$1,27 \cdot E-2$	0,0004	$5,10 \cdot E-2$
Média	0,0001	$1,27 \cdot E-2$	0,0004	$5,10 \cdot E-2$

Fonte: O próprio autor.

Como no segundo teste houve uma discrepância relativamente grande em relação aos dados de perda de massa e volume do pino, eles foram desconsiderados para diminuir a imprecisão.

Logo após, utilizou-se o monitor automático de partículas para registrar os índices da amostra (PQ) antes e após os testes para demonstrar dados sobre as partículas ferromagnéticas, apresentados na Tabela 5, lembrando que foi testado 10 vezes.

Tabela 5: Índices PQ registrados para LGQ01

Ensaio	PQ antes	PQ depois
1	11	24
2	9	23
3	14	24
4	14	24
5	10	24
6	14	24
7	10	22
8	15	26
9	12	27
10	14	24
Média	12,3	24,2

Fonte: O próprio autor.

Pela testagem com o espectrômetro de raios X, encontrou-se os dados quanto a concentrações dos elementos químicos na amostra, contudo registrou-se apenas as de ferro (Fe), níquel (Ni) e cobalto (Co), os quais são ferromagnéticos, assim mostradas na Tabela 6, junto com a concentração total.

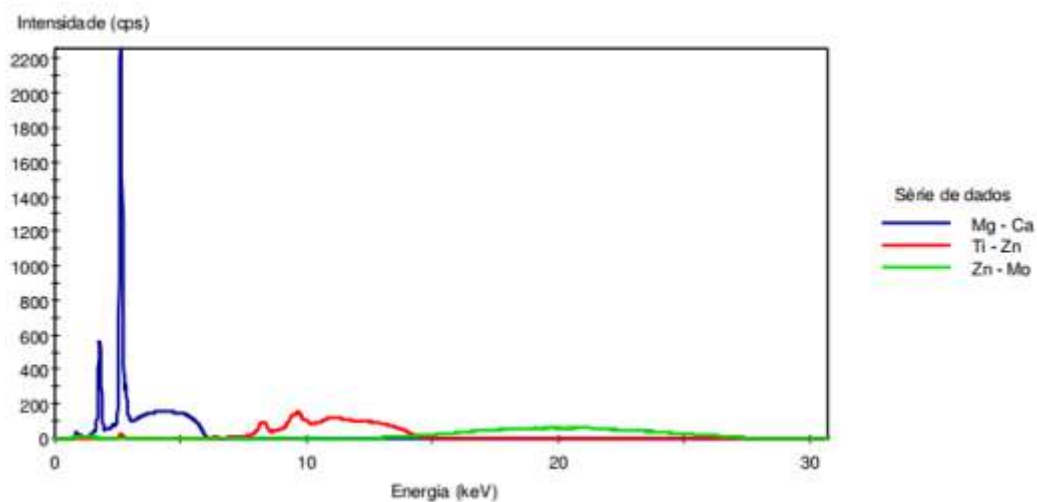
Tabela 6: Concentrações de partículas ferrosas em LGQ01

Metais	Concentrações (mg/kg)
Fe	32,4
Ni	3,9
Co	0,5
Total	36,8

Fonte: O próprio autor.

Na Figura 16 está o espectro gerado pela amostra, o qual será utilizado como sinal.

Figura 16: Espectros produzidos pela amostra LGQ01



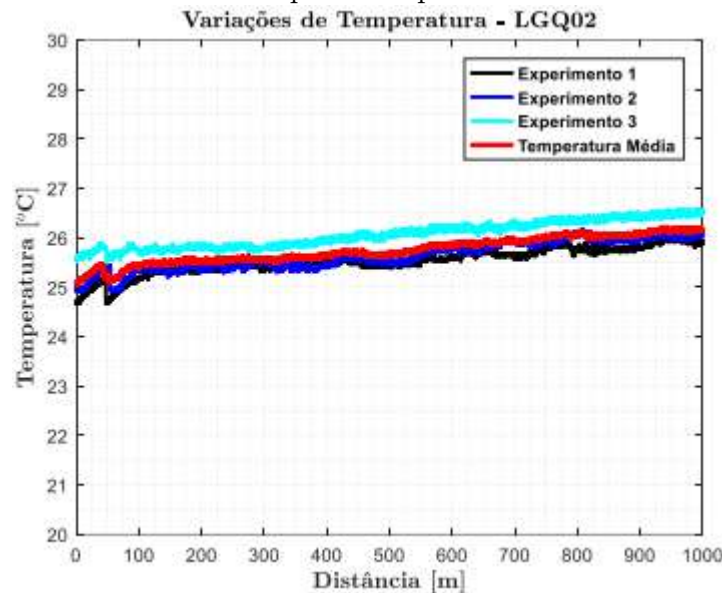
Fonte: o próprio autor.

Para os demais lubrificantes serão apresentadas as análises da mesma forma e ordem, para facilitar a leitura.

4.2.2 LGQ02

Os dados de temperatura durante a distância de deslizamento foram registrados de forma gráfica, apresentados na Figura 17 e expostos na Tabela 7, os valores máximo e mínimo além da variação entre eles.

Figura 17: Dados de temperatura para os 3 ensaios de LGQ02



Fonte: o próprio autor.

Tabela 7: Resultados de temperatura de LGQ02

Ensaio	Temperaturas		
	T _{máx} (°C)	T _{mín} (°C)	ΔT (°C)
1	26,05	24,67	1,38
2	26,15	24,91	1,24
3	26,60	25,54	1,06
Média	26,23	25,05	1,18

Fonte: O próprio autor.

Na Tabela 8 estão os dados de perda de massa e volume em cada ensaio de LGQ02 para o pino e o disco assim como a média.

Tabela 8: Perdas de massa e volume das amostras em LGQ02

Ensaio	Pino		Disco	
	m _p (g)	V _p (mm ³)	m _p (g)	V _p (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: O próprio autor.

Não houve a necessidade de descartar dados, pois não houve tanta discrepância.

Na Tabela 9 estão os índices PQ antes e depois dos ensaios.

Tabela 9: Índices PQ registrados para LGQ02

Ensaio	PQ antes	PQ depois
1	9	33
2	12	33
3	11	32
4	10	32
5	13	34
6	10	33
7	9	33
8	11	34
9	10	33
10	12	33
Média	10,7	33

Fonte: O próprio autor.

Na Tabela 10 foram anotadas as concentrações das partículas ferromagnéticas e o total em LGQ02.

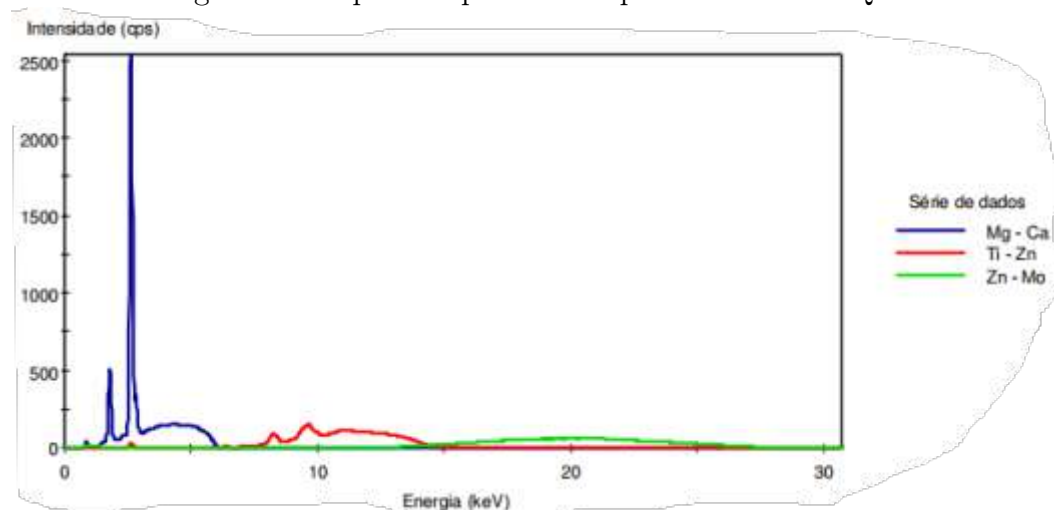
Tabela 10: Concentrações de partículas ferrosas em LGQ02

Metais	Concentrações (mg/kg)
Fe	37,9
Ni	1,4
Co	0
Total	39,3

Fonte: O próprio autor.

Na Figura 18 está seu espectro produzido a ser utilizado como sinal.

Figura 18: Espectros produzidos pela amostra LGQ02

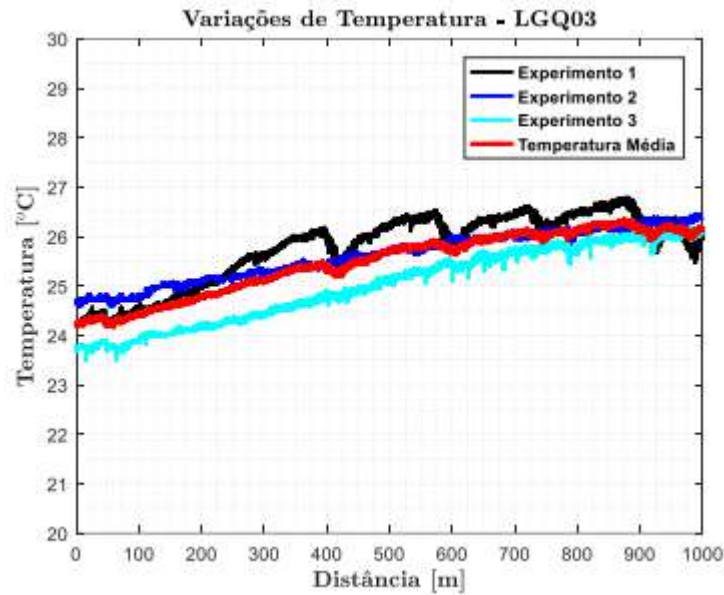


Fonte: o próprio autor.

4.2.3 LGQ03

Os dados de temperatura durante a distância de deslizamento foram registrados de forma gráfica, apresentados na Figura 19 e expostos na Tabela 11, os valores máximo e mínimo além da variação entre eles.

Figura 19: Dados de temperatura para os 3 ensaios de LGQ03



Fonte: o próprio autor.

Tabela 11: Resultados de temperatura de LGQ03

Ensaio	Temperaturas		
	T _{máx} (°C)	T _{mín} (°C)	ΔT (°C)
1	26,79	24,19	2,60
2	26,47	24,61	1,86
3	26,29	23,49	2,80
Média	26,35	24,16	2,19

Fonte: O próprio autor.

Na Tabela 12 estão os dados de perda de massa e volume em cada ensaio de LGQ03 para o pino e o disco assim como a média.

Tabela 12: Perdas de massa e volume das amostras em LGQ03

Ensaio	Pino		Disco	
	m _p (g)	V _p (mm ³)	m _p (g)	V _p (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: O próprio autor.

Não houve a necessidade de descartar dados, pois não houve tanta discrepância.

Na Tabela 13 estão os índices PQ antes e depois dos ensaios.

Tabela 13: Índices PQ registrados para LGQ03

Ensaio	PQ antes	PQ depois
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: O próprio autor.

Na Tabela 14 foram anotadas as concentrações das partículas ferromagnéticas e o total em LGQ03.

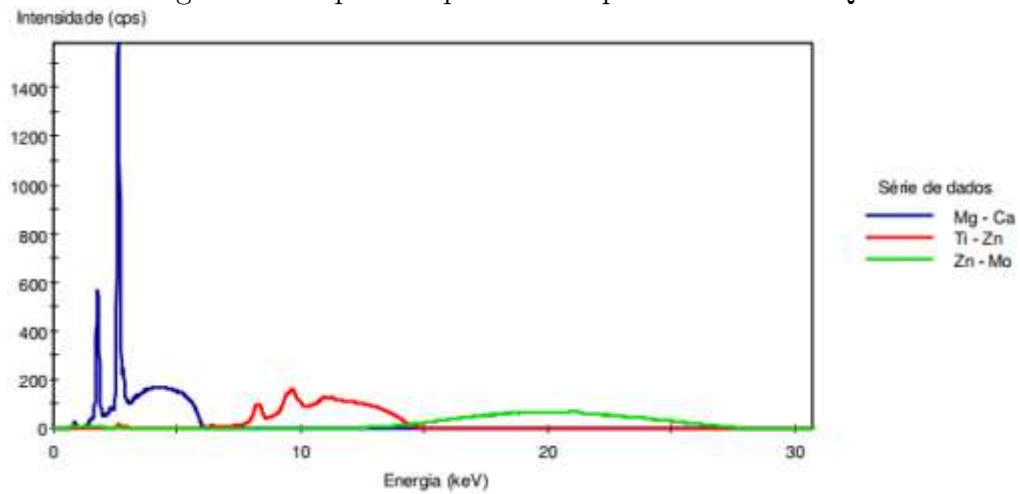
Tabela 14: Concentrações de partículas ferrosas em LGQ03

Metais	Concentrações (mg/kg)
Fe	62,8
Ni	5,6
Co	2,9
Total	71,3

Fonte: O próprio autor.

Na Figura 20 está seu espectro produzido a ser utilizado como sinal.

Figura 20: Espectros produzidos pela amostra LGQ03

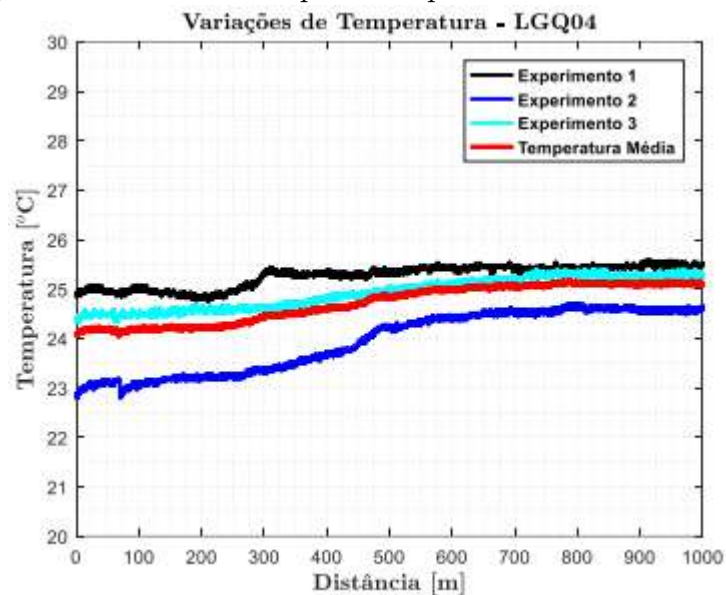


Fonte: o próprio autor.

4.2.4 LGQ04

Os dados de temperatura durante a distância de deslizamento foram registrados de forma gráfica, apresentados na Figura 21 e expostos na Tabela 15, os valores máximo e mínimo além da variação entre eles.

Figura 21: Dados de temperatura para os 3 ensaios de LGQ04



Fonte: o próprio autor.

Tabela 15: Resultados de temperatura de LGQ04

Ensaio	Temperaturas		
	T _{máx} (°C)	T _{mín} (°C)	ΔT (°C)
1	25,57	24,75	0,82
2	24,68	22,85	1,83
3	25,44	24,30	1,14
Média	25,17	24,04	1,13

Fonte: O próprio autor.

Na Tabela 16 estão os dados de perda de massa e volume em cada ensaio de LGQ04 para o pino e o disco assim como a média.

Tabela 16: Perdas de massa e volume das amostras em LGQ04

Ensaio	Pino		Disco	
	m _p (g)	V _p (mm ³)	m _p (g)	V _p (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: O próprio autor.

Descartou-se os dados de perda de massa e volume do segundo ensaio para o disco devido a sua discrepância em relação aos outros resultados.

Na Tabela 17 estão os índices PQ antes e depois dos ensaios.

Tabela 17: Índices PQ registrados para LGQ04

Ensaio	PQ antes	PQ depois
1	5	10
2	4	8
3	7	7
4	4	11
5	9	9
6	7	10
7	5	8
8	8	10
9	7	9
10	4	9
Média	6	9,1

Fonte: O próprio autor.

Na Tabela 18 foram anotadas as concentrações das partículas ferromagnéticas e o total em LGQ04.

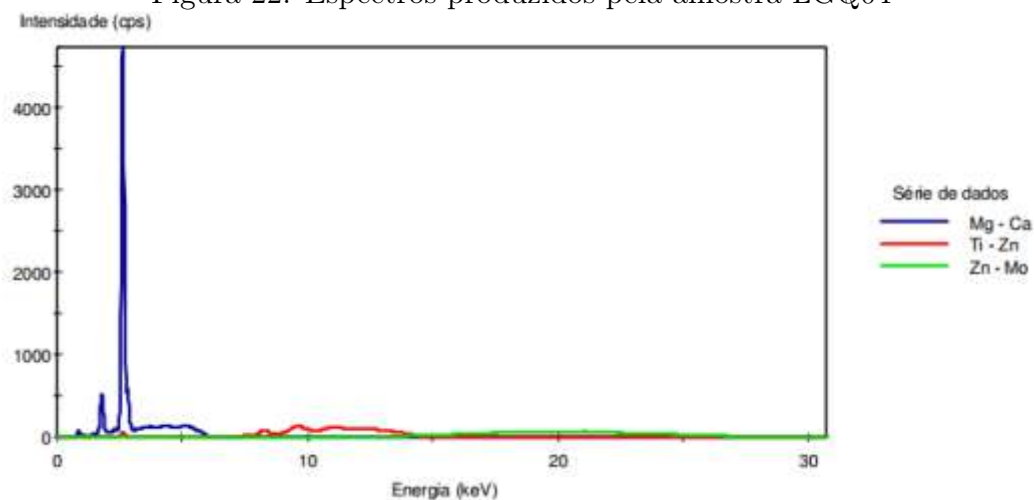
Tabela 18: Concentrações de partículas ferrosas em LGQ04

Metais	Concentrações (mg/kg)
Fe	14,4
Ni	0
Co	0
Total	14,4

Fonte: O próprio autor.

Na Figura 22 está seu espectro produzido a ser utilizado como sinal.

Figura 22: Espectros produzidos pela amostra LGQ04



Fonte: o próprio autor.

4.2.5 LGQ05

Os dados de temperatura durante a distância de deslizamento foram registrados de forma gráfica, apresentados na Figura 23 e expostos na Tabela 19, os valores máximo e mínimo além da variação entre eles.

Tabela 19: Resultados de temperatura de LGQ05

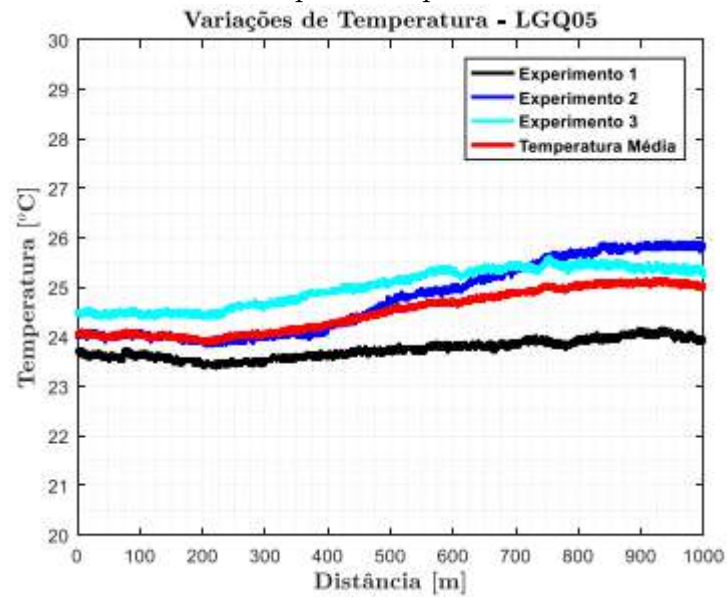
Ensaio	Temperaturas		
	T _{máx} (°C)	T _{mín} (°C)	ΔT (°C)
1	24,17	23,37	0,80
2	25,91	23,81	2,10
3	25,61	24,37	1,24
Média	25,16	23,88	1,28

Fonte: O próprio autor.

Na Tabela 20 estão os dados de perda de massa e volume em cada ensaio de LGQ05 para o pino e o disco assim como a média.

Descartou-se os dados de perda de massa e volume do segundo ensaio para o disco devido a sua discrepância em relação aos outros resultados.

Figura 23: Dados de temperatura para os 3 ensaios de LGQ05



Fonte: o próprio autor.

Tabela 20: Perdas de massa e volume das amostras em LGQ05

Ensaio	Pino		Disco	
	m_p (g)	V_p (mm ³)	m_p (g)	V_p (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: O próprio autor.

Na Tabela 21 estão os índices PQ antes e depois dos ensaios.

Tabela 21: Índices PQ registrados para LGQ05

Ensaio	PQ antes	PQ depois
1	14	12
2	11	16
3	15	15
4	12	14
5	12	14
6	12	16
7	12	12
8	11	13
9	12	14
10	14	14
Média	12,5	14

Fonte: O próprio autor.

Na Tabela 22 foram anotadas as concentrações das partículas ferromagnéticas e o total em LGQ05.

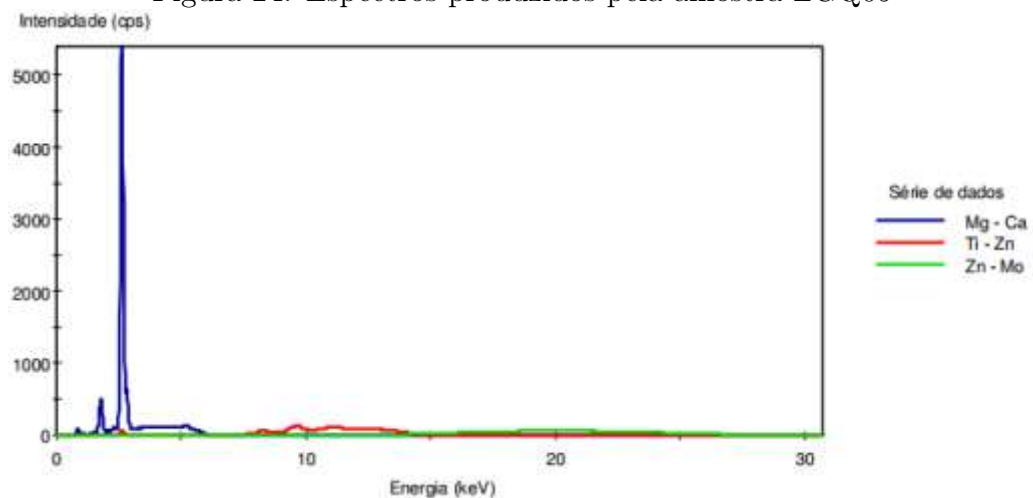
Tabela 22: Concentrações de partículas ferrosas em LGQ05

Metais	Concentrações (mg/kg)
Fe	8,5
Ni	0
Co	0
Total	8,5

Fonte: O próprio autor.

Na Figura 24 está seu espectro produzido a ser utilizado como sinal.

Figura 24: Espectros produzidos pela amostra LGQ05

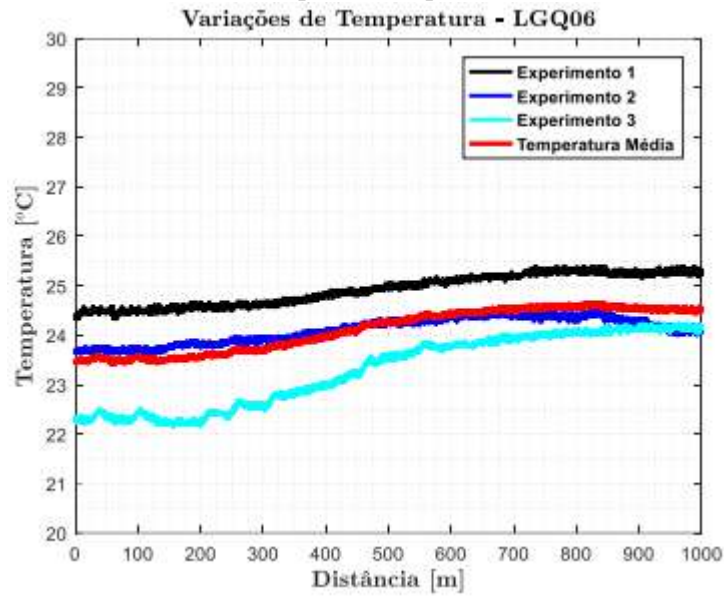


Fonte: o próprio autor.

4.2.6 LGQ06

Os dados de temperatura durante a distância de deslizamento foram registrados de forma gráfica, apresentados na Figura 25 e expostos na Tabela 23, os valores máximo e mínimo além da variação entre eles.

Figura 25: Dados de temperatura para os 3 ensaios de LGQ06



Fonte: o próprio autor.

Tabela 23: Resultados de temperatura de LGQ06

Ensaio	Temperaturas		
	T _{máx} (°C)	T _{mín} (°C)	ΔT (°C)
1	24,17	23,37	0,80
2	25,91	23,81	2,10
3	25,61	24,37	1,24
Média	25,16	23,88	1,28

Fonte: O próprio autor.

Na Tabela 24 estão os dados de perda de massa e volume em cada ensaio de LGQ06 para o pino e o disco assim como a média.

Tabela 24: Perdas de massa e volume das amostras em LGQ06

Ensaio	Pino		Disco	
	m _p (g)	V _p (mm ³)	m _p (g)	V _p (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: O próprio autor.

Descartou-se os dados de perda de massa e volume do segundo ensaio para o disco devido a sua discrepância em relação aos outros resultados.

Na Tabela 25 estão os índices PQ antes e depois dos ensaios.

Tabela 25: Índices PQ registrados para LGQ06

Ensaio	PQ antes	PQ depois
1	7	31
2	9	32
3	7	30
4	9	31
5	12	30
6	9	31
7	9	31
8	10	33
9	10	33
10	9	34
Média	9,1	31,6

Fonte: O próprio autor.

Na Tabela 26 foram anotadas as concentrações das partículas ferromagnéticas e o total em LGQ06.

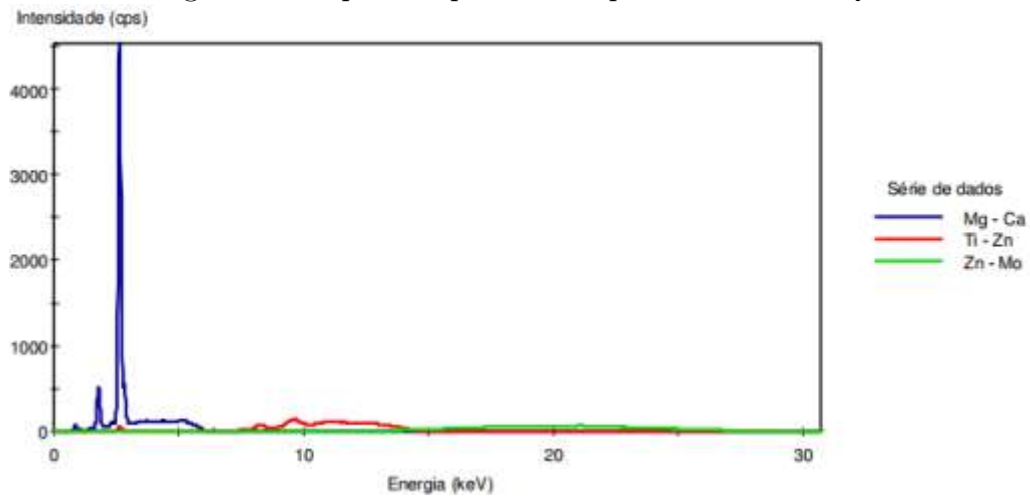
Tabela 26: Concentrações de partículas ferrosas em LGQ06

Metais	Concentrações (mg/kg)
Fe	38,1
Ni	0
Co	0
Total	38,1

Fonte: O próprio autor.

Na Figura 26 está seu espectro produzido a ser utilizado como sinal.

Figura 26: Espectros produzidos pela amostra LGQ06

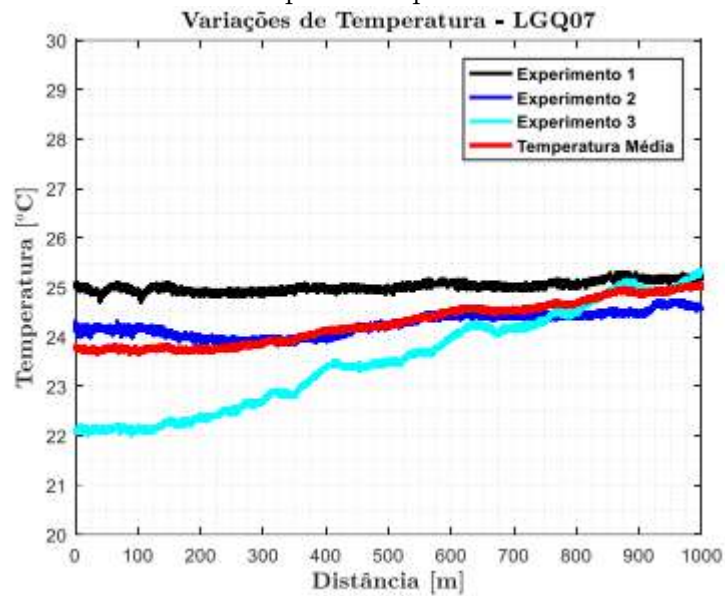


Fonte: o próprio autor.

4.2.7 LGQ07

Os dados de temperatura durante a distância de deslizamento foram registrados de forma gráfica, apresentados na Figura 27 e expostos na Tabela 27, os valores máximo e mínimo além da variação entre eles.

Figura 27: Dados de temperatura para os 3 ensaios de LGQ07



Fonte: o próprio autor.

Tabela 27: Resultados de temperatura de LGQ07

Ensaio	Temperaturas		
	T _{máx} (°C)	T _{mín} (°C)	ΔT (°C)
1	25,39	24,71	0,68
2	24,71	23,81	0,90
3	25,43	21,99	3,44
Média	25,07	23,64	1,43

Fonte: O próprio autor.

Na Tabela 28 estão os dados de perda de massa e volume em cada ensaio de LGQ08 para o pino e o disco assim como a média.

Tabela 28: Perdas de massa e volume das amostras em LGQ07

Ensaio	Pino		Disco	
	m _p (g)	V _p (mm ³)	m _p (g)	V _p (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	2,57·E-2
Média	0,00017	2,13·E-2	0,0002	2,55·E-2

Fonte: O próprio autor.

Não houve a necessidade de descartar dados, pois não houve tanta discrepância.

Na Tabela 29 estão os índices PQ antes e depois dos ensaios.

Tabela 29: Índices PQ registrados para LGQ07

Ensaio	PQ antes	PQ depois
1	24	26
2	21	24
3	24	27
4	21	24
5	22	22
6	21	23
7	22	24
8	21	24
9	21	24
10	20	25
Média	21,7	24,3

Fonte: O próprio autor.

Na Tabela 30 foram anotadas as concentrações das partículas ferromagnéticas e o total em LGQ07.

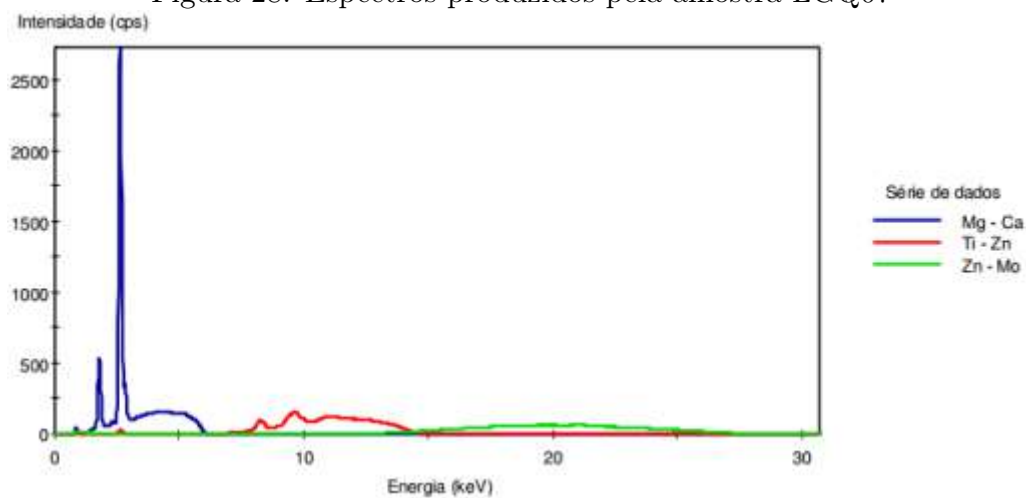
Tabela 30: Concentrações de partículas ferrosas em LGQ07

Metais	Concentrações (mg/kg)
Fe	9,5
Ni	4,4
Co	0,9
Total	14,8

Fonte: O próprio autor.

Na Figura 28 está seu espectro produzido a ser utilizado como sinal.

Figura 28: Espectros produzidos pela amostra LGQ07

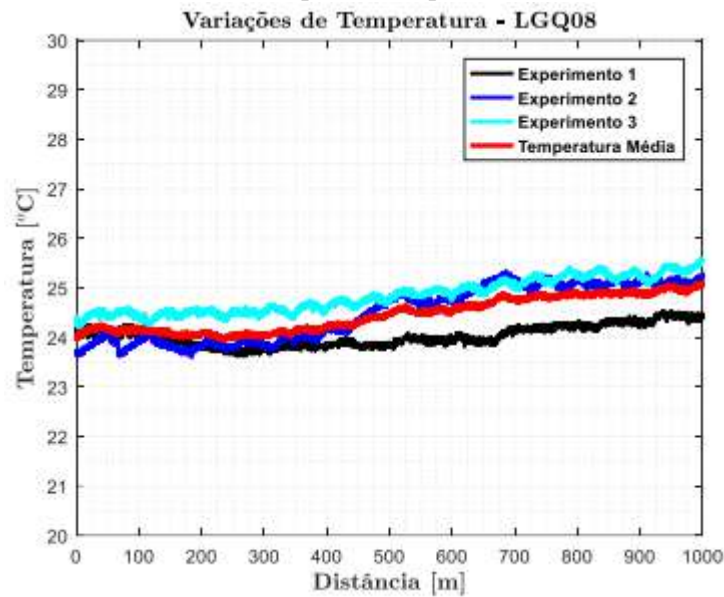


Fonte: o próprio autor.

4.2.8 LGQ08

Os dados de temperatura durante a distância de deslizamento foram registrados de forma gráfica, apresentados na Figura 29 e expostos na Tabela 31, os valores máximo e mínimo além da variação entre eles.

Figura 29: Dados de temperatura para os 3 ensaios de LGQ08



Fonte: o próprio autor.

Tabela 31: Resultados de temperatura de LGQ08

Ensaio	Temperaturas		
	T _{máx} (°C)	T _{mín} (°C)	ΔT (°C)
1	24,61	23,63	0,98
2	25,33	23,59	1,74
3	25,71	24,19	1,52
Média	25,13	23,93	1,20

Fonte: O próprio autor.

Na Tabela 32 estão os dados de perda de massa e volume em cada ensaio de LGQ08 para o pino e o disco assim como a média.

Tabela 32: Perdas de massa e volume das amostras em LGQ08

Ensaio	Pino		Disco	
	m _p (g)	V _p (mm ³)	m _p (g)	V _p (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	3,82·E-2	0,0003	3,82·E-2

Fonte: O próprio autor.

Descartou-se os dados de perda de massa e volume do segundo ensaio para o disco devido a sua discrepância em relação aos outros resultados.

Na Tabela 33 estão os índices PQ antes e depois dos ensaios.

Tabela 33: Índices PQ registrados para LGQ08

Ensaio	PQ antes	PQ depois
1	23	25
2	26	26
3	22	26
4	25	30
5	26	28
6	22	27
7	24	26
8	24	26
9	22	26
10	24	24
Média	23,8	26,4

Fonte: O próprio autor.

Na Tabela 34 foram anotadas as concentrações das partículas ferromagnéticas e o total em LGQ08.

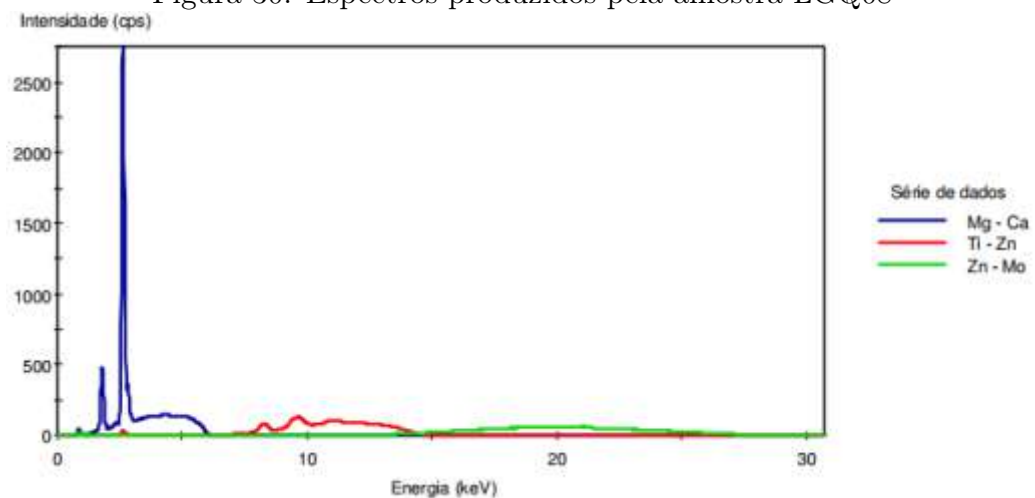
Tabela 34: Concentrações de partículas ferrosas em LGQ08

Metais	Concentrações (mg/kg)
Fe	4,2
Ni	0
Co	0
Total	4,2

Fonte: O próprio autor.

Na Figura 30 está seu espectro produzido a ser utilizado como sinal.

Figura 30: Espectros produzidos pela amostra LGQ08

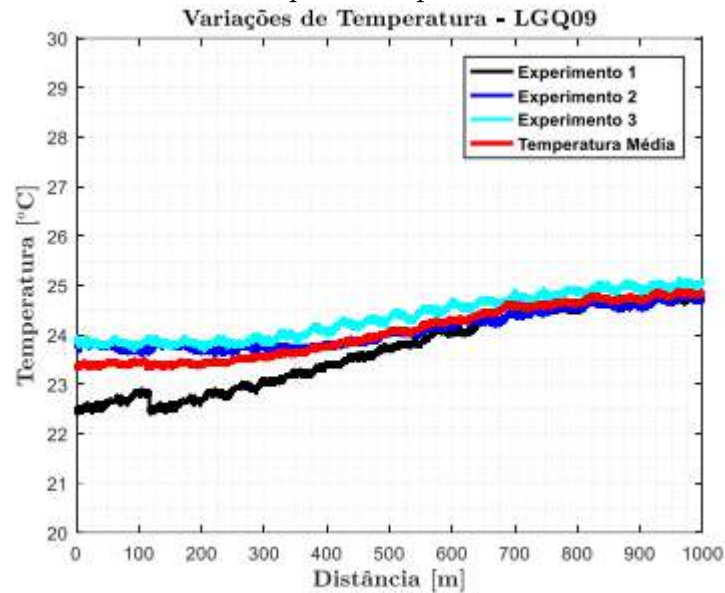


Fonte: o próprio autor.

4.2.9 LGQ09

Os dados de temperatura durante a distância de deslizamento foram registrados de forma gráfica, apresentados na Figura 31 e expostos na Tabela 35, os valores máximo e mínimo além da variação entre eles.

Figura 31: Dados de temperatura para os 3 ensaios de LGQ09



Fonte: o próprio autor.

Tabela 35: Resultados de temperatura de LGQ09

Ensaio	Temperaturas		
	T _{máx} (°C)	T _{mín} (°C)	ΔT (°C)
1	24,91	22,39	2,52
2	24,92	23,59	1,33
3	25,19	23,67	1,52
Média	24,92	23,30	1,62

Fonte: O próprio autor.

Na Tabela 36 estão os dados de perda de massa e volume em cada ensaio de LGQ09 para o pino e o disco assim como a média.

Tabela 36: Perdas de massa e volume das amostras em LGQ09

Ensaio	Pino		Disco	
	m _p (g)	V _p (mm ³)	m _p (g)	V _p (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	3,82·E-2
Média	0,00017	2,13·E-2	0,00027	3,39·E-2

Fonte: O próprio autor.

Não houve a necessidade de descartar dados, pois não houve tanta discrepância.

Na Tabela 37 estão os índices PQ antes e depois dos ensaios.

Tabela 37: Índices PQ registrados para LGQ09

Ensaio	PQ antes	PQ depois
1	20	59
2	20	60
3	19	61
4	19	61
5	19	62
6	18	61
7	19	62
8	17	59
9	18	60
10	18	58
Média	18,7	60,3

Fonte: O próprio autor.

Na Tabela 38 foram anotadas as concentrações das partículas ferromagnéticas e o total em LGQ09.

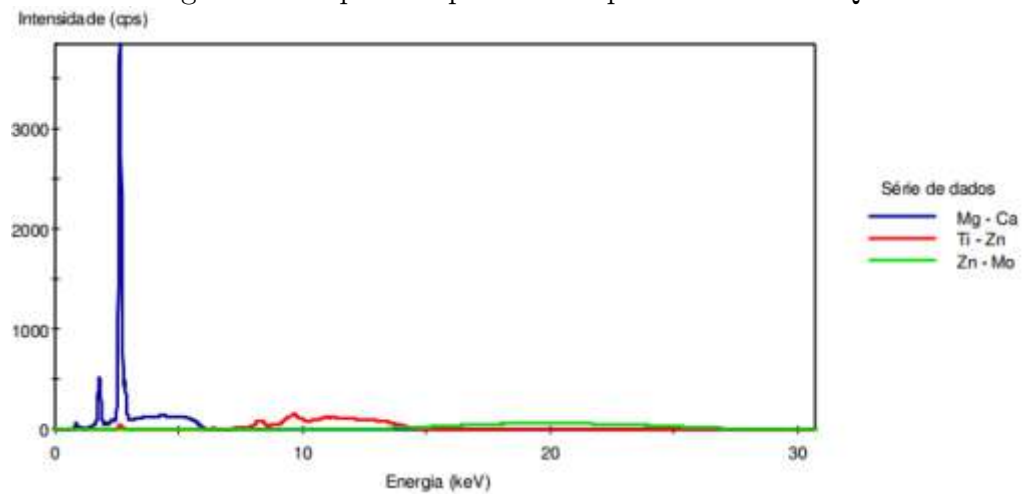
Tabela 38: Concentrações de partículas ferrosas em LGQ09

Metais	Concentrações (mg/kg)
Fe	28
Ni	0
Co	0
Total	28

Fonte: O próprio autor.

Na Figura 32 está seu espectro produzido a ser utilizado como sinal.

Figura 32: Espectros produzidos pela amostra LGQ09



Fonte: o próprio autor.

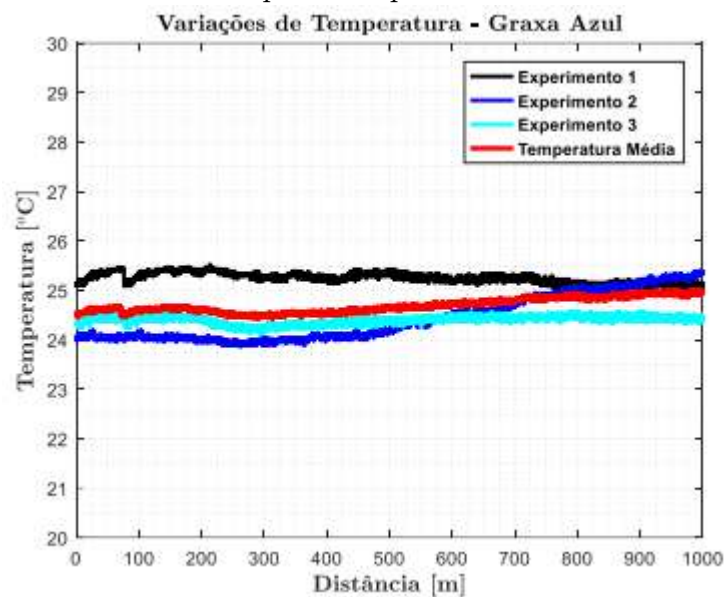
4.3 Lubrificantes Minerais

Assim como foi feito com os lubrificantes vegetais, os comerciais minerais passaram pelos mesmos teste e foram analisados, a fim de fazer uma comparação posteriormente de acordo com a performance e adquirir os sinais.

4.3.1 Graxa Azul (FAG multiuso)

Os dados de temperatura durante a distância de deslizamento foram registrados de forma gráfica, apresentados na Figura 33 e expostos na Tabela 39, os valores máximo e mínimo além da variação entre eles.

Figura 33: Dados de temperatura para os 3 ensaios da Graxa Azul



Fonte: o próprio autor.

Tabela 39: Resultados de temperatura da Graxa Azul

Ensaio	Temperaturas		
	T _{máx} (°C)	T _{mín} (°C)	ΔT (°C)
1	25,53	24,95	0,58
2	25,43	23,85	1,58
3	24,57	24,09	0,48
Média	25,02	24,44	0,58

Fonte: O próprio autor.

Na Tabela 40 estão os dados de perda de massa e volume em cada ensaio da Graxa Azul para o pino e o disco assim como a média.

Tabela 40: Perdas de massa e volume das amostras na Graxa Azul

Ensaio	Pino		Disco	
	m _p (g)	V _p (mm ³)	m _p (g)	V _p (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: O próprio autor.

Não houve a necessidade de descartar dados, pois não houve tanta discrepância.

Na Tabela 41 estão os índices PQ antes e depois dos ensaios.

Tabela 41: Índices PQ registrados para a Graxa Azul

Ensaio	PQ antes	PQ depois
1	10	12
2	8	12
3	9	17
4	10	14
5	9	13
6	11	15
7	9	12
8	8	13
9	6	14
10	8	12
Média	8,8	13,4

Fonte: O próprio autor.

Na Tabela 42 foram anotadas as concentrações das partículas ferromagnéticas e o total na Graxa Azul.

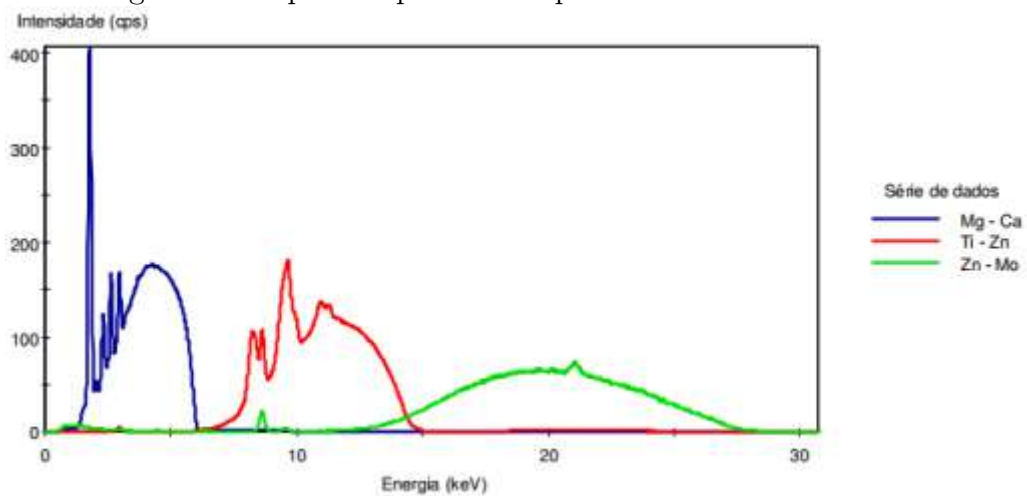
Tabela 42: Concentrações de partículas ferrosas na Graxa Azul

Metais	Concentrações (mg/kg)
Fe	6,1
Ni	10,5
Co	5,5
Total	22,1

Fonte: O próprio autor.

Na Figura 34 está seu espectro produzido a ser utilizado como sinal.

Figura 34: Espectros produzidos pela amostra da Graxa Azul



Fonte: o próprio autor.

4.3.2 Graxa Branca (Yourlub)

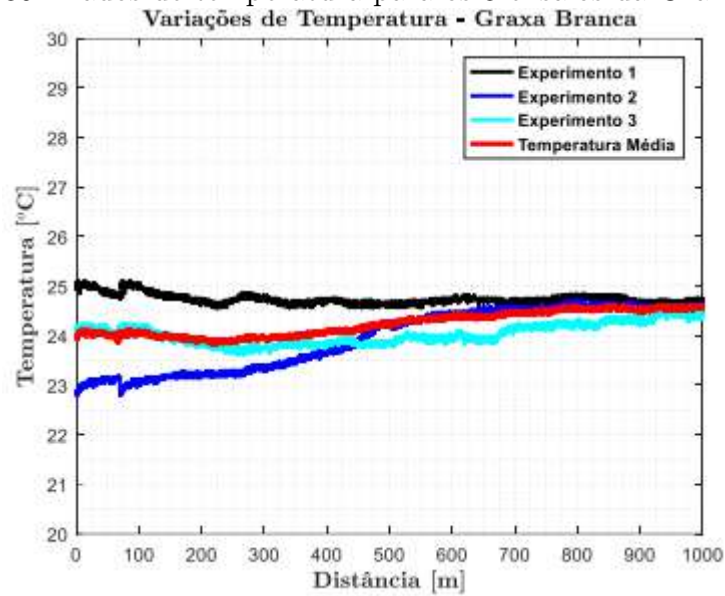
Os dados de temperatura durante a distância de deslizamento foram registrados de forma gráfica, apresentados na Figura 35 e expostos na Tabela 43, os valores máximo e mínimo além da variação entre eles.

Tabela 43: Resultados de temperatura da Graxa Branca

Ensaio	Temperaturas		
	T _{máx} (°C)	T _{mín} (°C)	ΔT (°C)
1	25,09	24,57	0,52
2	24,71	22,81	1,90
3	24,65	23,68	0,97
Média	24,65	23,83	0,82

Fonte: O próprio autor.

Figura 35: Dados de temperatura para os 3 ensaios da Graxa Branca



Fonte: o próprio autor.

Na Tabela 44 estão os dados de perda de massa e volume em cada ensaio da Graxa Branca para o pino e o disco assim como a média.

Tabela 44: Perdas de massa e volume das amostras na Graxa Branca

Ensaio	Pino		Disco	
	m_p (g)	V_p (mm ³)	m_p (g)	V_p (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: O próprio autor.

Não houve a necessidade de descartar dados, pois não houve tanta discrepância.

Na Tabela 45 estão os índices PQ antes e depois dos ensaios.

Tabela 45: Índices PQ registrados para a Graxa Branca

Ensaio	PQ antes	PQ depois
1	8	14
2	9	17
3	9	18
4	11	14
5	9	16
6	12	20
7	9	18
8	10	17
9	10	20
10	9	14
Média	9,6	16,8

Fonte: O próprio autor.

Na Tabela 46 foram anotadas as concentrações das partículas ferromagnéticas e o total na Graxa Branca.

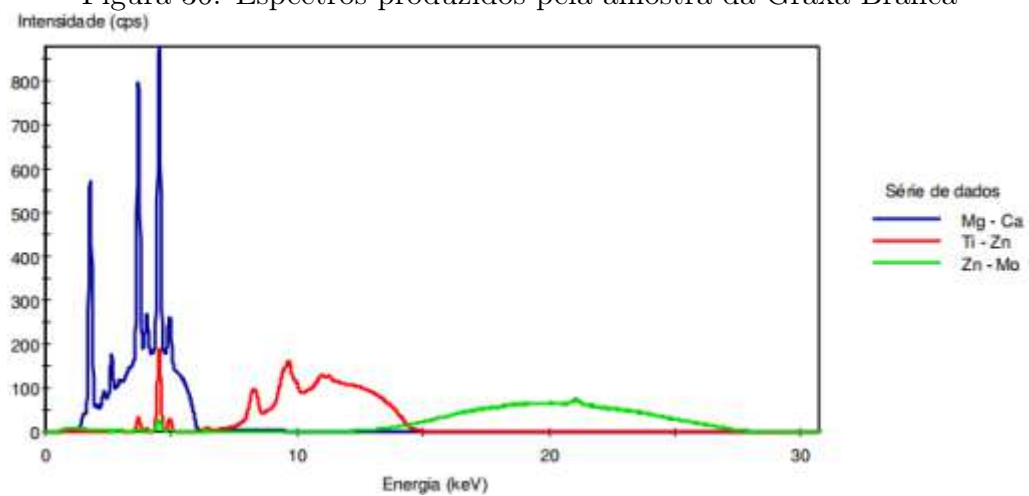
Tabela 46: Concentrações de partículas ferrosas na Graxa Branca

Metais	Concentrações (mg/kg)
Fe	34,6
Ni	5
Co	2
Total	41,6

Fonte: O próprio autor.

Na Figura 36 está seu espectro produzido a ser utilizado como sinal.

Figura 36: Espectros produzidos pela amostra da Graxa Branca



Fonte: o próprio autor.

4.4 Comparação

Para trazer uma comparação entre os lubrificantes, montou-se a Tabela 47, assim fica de fácil visualização os dados obtidos, onde a partir do aumento de temperatura e perdas de volume das peças é possível relacioná-las de acordo com seus grupos (processo e base das biograxas e graxas comerciais). As outras análises feitas apesar de relevantes, por terem sido feitas com uma pequena parcela da amostra, mesmo assim os dados de concentração das partículas ferrosas teve sua consideração embutida.

Tabela 47: Comparação dos resultados das graxas

Lubrificante	ΔT (°C)	$V_{p,pino}$ (mm ³)	$V_{p,disco}$ (mm ³)
LGQ01	1,69	1,27·E-2	5,10·E-2
LGQ02	1,18	3,39·E-2	2,97·E-2
LGQ03	2,19	15,7·E-2	10,6·E-2
LGQ04	1,13	4,67·E-2	2,55·E-2
LGQ05	1,28	2,13·E-2	1,27·E-2
LGQ06	1,24	3,82·E-2	1,69·E-2
LGQ07	1,43	2,13·E-2	2,55·E-2
LGQ08	1,20	3,39·E-2	3,82·E-2
LGQ09	1,62	2,13·E-2	3,39·E-2
Graxa Azul	0,58	2,97·E-2	4,67·E-2
Graxa Branca	0,82	3,82·E-2	5,10·E-2

Fonte: O próprio autor.

Para o primeiro grupo (LGQ01 a 03), que são os óleos de soja à base de sódio preparados com saponificação direta, não se obteve resultados muito bons, visto que a perda de volume total das peças foi bem alta, além da alta concentração de particulados ferromagnéticos encontrada, onde a LGQ03 acabou tendo a pior performance e a 01 a melhor.

Já o segundo grupo (LGQ04 a 06), também óleos de soja, mas estes à base de lítio e preparados por uma mistura entre o sabão sintetizado e o óleo, houve uma concentração de partículas menor em relação ao primeiro. Foi possível observar também uma melhora na performance, onde aparentemente a LGQ05 foi a melhor em questões de perda de volume e concentração de partículas.

No caso do terceiro grupo (LGQ07 a 09), os quais também são óleos de soja à base de lítio com uma metodologia de preparação igual ao primeiro grupo. Percebeu-se que, num geral, não houveram variações discrepantes de performance, mas a LGQ07 acabou se superando devido a menor perda de volume e pouca concentração, a LGQ08 apesar de ter a menor concentração teve grandes perdas de volume, o que sugere que talvez a espectrometria não tenha tido tanta precisão.

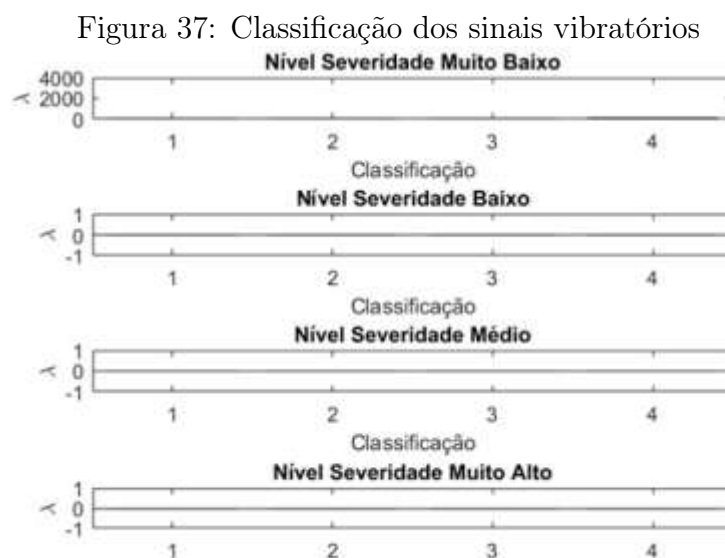
E o quarto grupo (Graxas azul e branca), tiveram um comportamento similar com pouca elevação de temperatura, mas a branca concentrou bem mais partículas e teve uma perda no volume das peças maior, o que sugere que a azul foi melhor.

4.5 Análise Artificial de Seleção Negativa

Coletados os dados dos ensaios tribológicos realizados, para realizar o objetivo de validar as biograxas em comparação com as minerais, adotou-se o algoritmo de seleção negativa para tratar os sinais vibratórios dos lubrificantes minerais como próprios, portanto sem falhas, o que forneceu um banco de dados com sinais próprios.

Os sinais vibratórios provindos dos biolubrificantes, teoricamente, representariam anomalias, assim sendo classificados num banco de dados de sinais não-próprios. Assim seriam comparados com os sinais próprios para avaliar sua afinidade, considerando uma taxa de afinidade de 70% e desvio-padrão de 3%, podendo tratá-los como falha ou não falha, dependendo da afinidade.

Para facilitar a compreensão, explanou-se graficamente a maneira do algoritmo realizar o diagnóstico, conforme a Figura 37 a seguir:

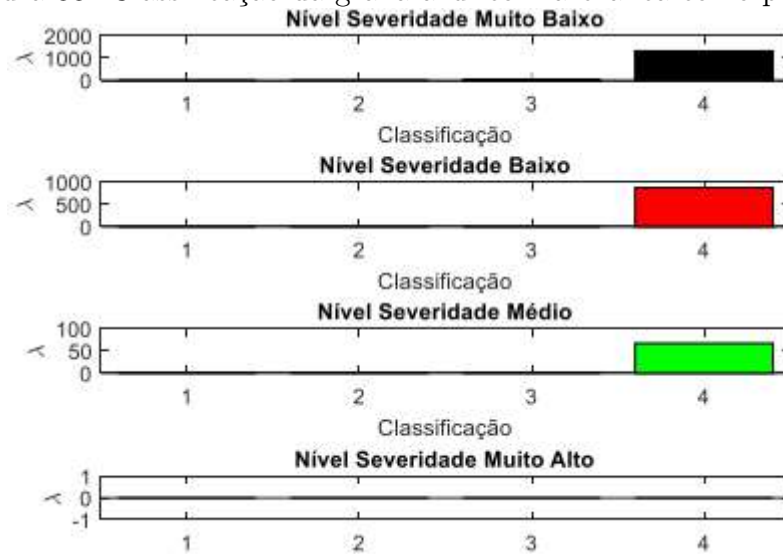


Fonte: O próprio autor, 2022.

Assim ao comparar os sinais próprio com os não próprios, o algoritmo classifica as vibrações geradas de acordo com o nível de severidade, sendo: Muito Baixo, Baixo, Médio e Muito Alto. Além do mais, há 4 outras divisões em cada nível, representadas em intervalos de 1 a 4, onde 1 representa variações de 0 a 25% das vibrações detectadas, 2 representa variações de 25 a 50%, 3 de 50 a 75% e 4 de 75 a 100%.

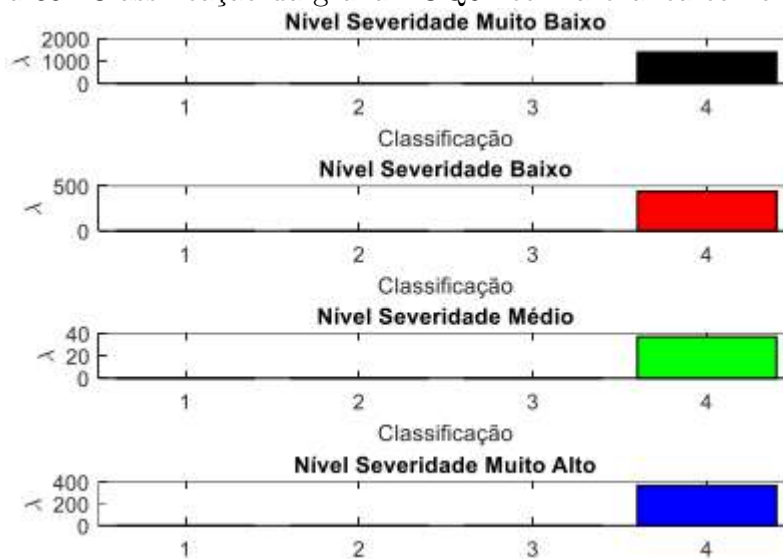
As próximas Figuras de 38 a 47, representam as classificações dos lubrificantes tratando a graxa branca como sinal próprio, é notável no caso que a graxa azul acabou sendo dada como sinal não-próprio.

Figura 38: Classificação da graxa azul com a branca como própria



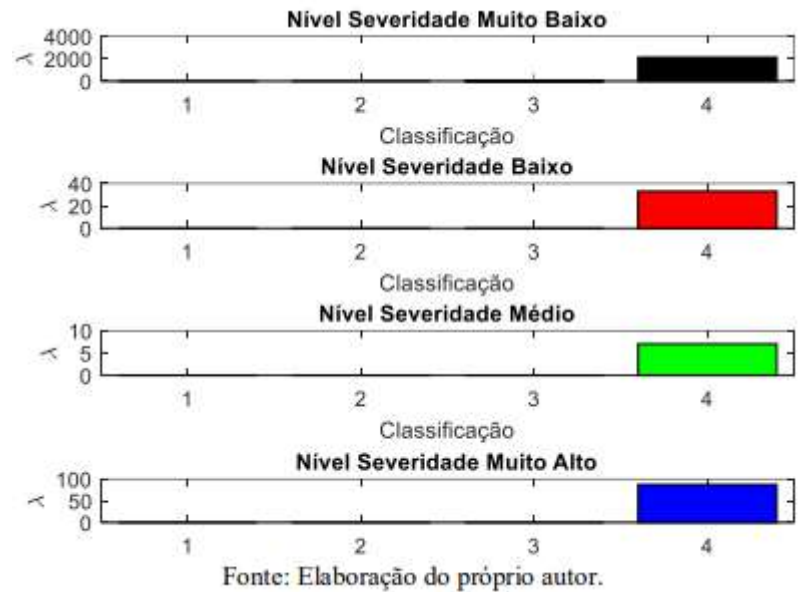
Fonte: O próprio autor, 2022.

Figura 39: Classificação da graxa LGQ01 com a branca como própria



Fonte: O próprio autor, 2022.

Figura 40: Classificação da graxa LGQ02 com a branca como própria



Fonte: O próprio autor, 2022.

Figura 41: Classificação da graxa LGQ03 com a branca como própria

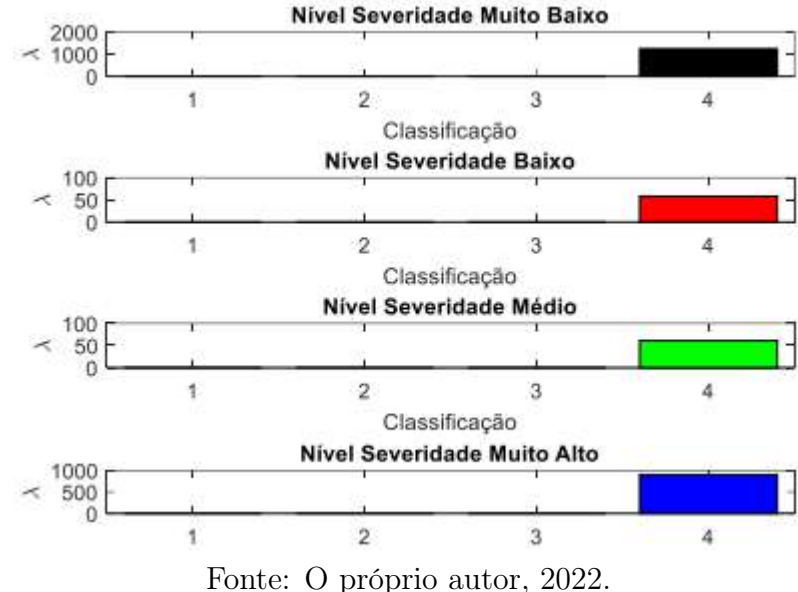
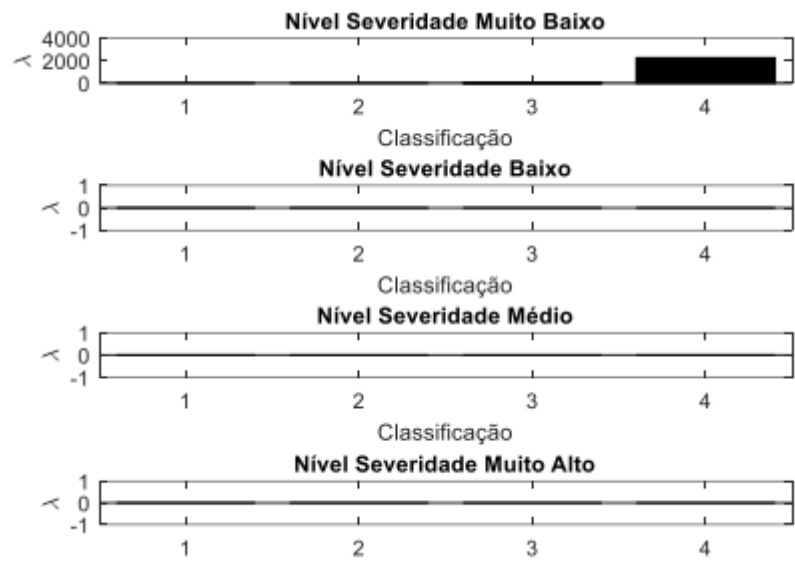


Figura 42: Classificação da graxa LGQ04 com a branca como própria



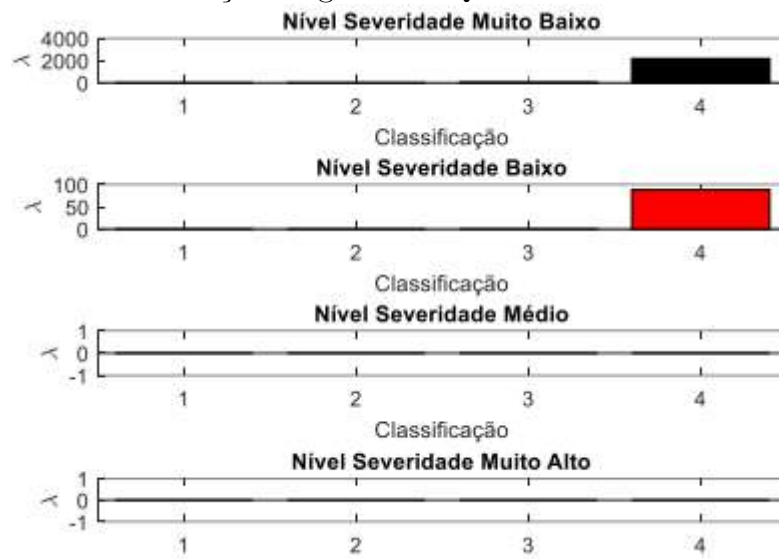
Fonte: O próprio autor, 2022.

Figura 43: Classificação da graxa LGQ05 com a branca como própria



Fonte: O próprio autor, 2022.

Figura 44: Classificação da graxa LGQ06 com a branca como própria



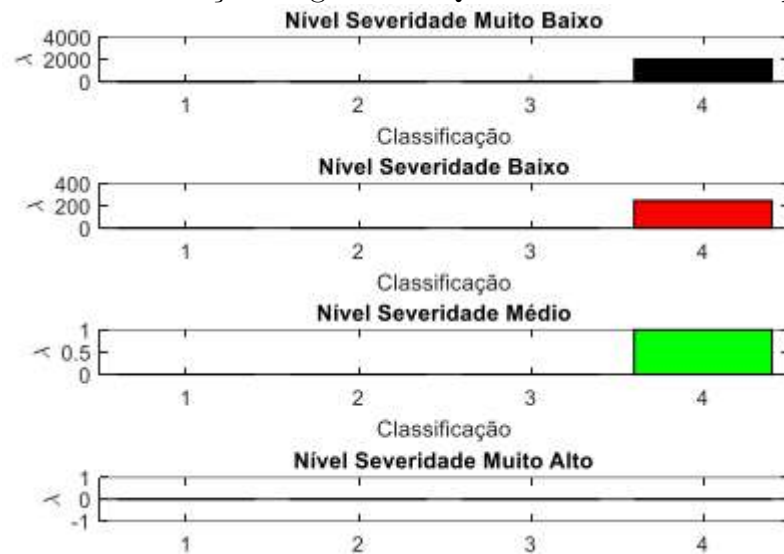
Fonte: O próprio autor, 2022.

Figura 45: Classificação da graxa LGQ07 com a branca como própria



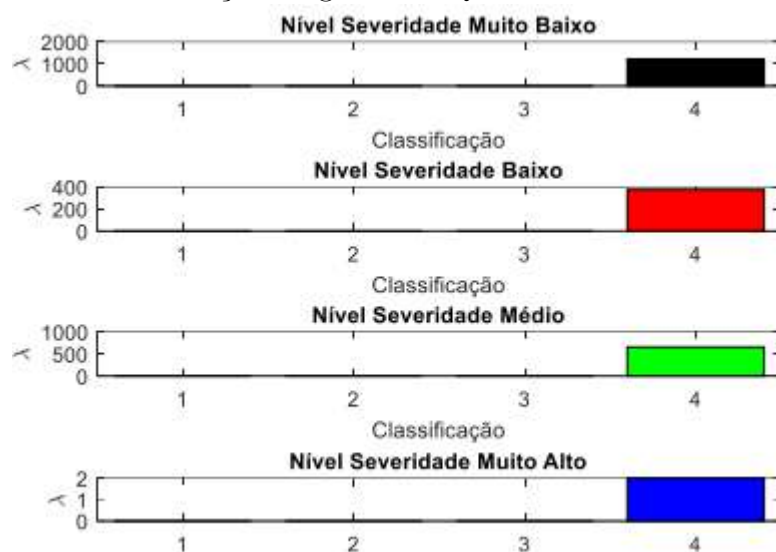
Fonte: O próprio autor, 2022.

Figura 46: Classificação da graxa LGQ08 com a branca como própria



Fonte: O próprio autor, 2022.

Figura 47: Classificação da graxa LGQ09 com a branca como própria



Fonte: O próprio autor, 2022.

A primeira coisa notável, é que todos os lubrificantes tiveram só classificações nos intervalos 4, ou seja grande variação dos sinais de frequência da vibração.

Foi possível observar o péssimo comportamento primeiro grupo de biograxas (LGQ01 a 03), classificando-se nos 4 níveis de severidade com amplitudes muito altas, o que confirma o desempenho péssimo do grupo visto com as análises dele.

No caso do segundo grupo (LGQ04 a 06), foram classificados apenas com severidade Muito Baixo, exceto o LGQ06 que teve no Baixo também, o que é muito válido de acordo com os resultados adquiridos pelas análises, onde este grupo teve uma ótima performance.

Para o terceiro grupo (LGQ07 a 09), houveram classificações em todos os níveis. O LGQ07 se classificou em apenas Muito Baixo, o LGQ08 de Muito Baixo a Médio e o

LGQ09 em todos os níveis de severidade, fez-se sentido ao levar em conta que o LGQ07 foi o destaque do grupo. Foi citado que o grupo teve um comportamento semelhante durante suas análises, contudo observando que não há amplitudes muito significativas alcançadas nos níveis mais severos.

É interessante analisar que o comportamento vibratório das duas graxas minerais não é semelhante, já que a graxa azul foi classificada em três níveis de severidade ao se comparar com a graxa branca.

Após isso tratou-se a graxa azul como sinal próprio, o que é mostrado nas Figuras 48 a 57 as classificações dos biolubrificantes e assim como no primeiro caso fez-se também em comparação com a outra graxa mineral, a branca, para fins de curiosidade, já que apesar de deverem ser consideradas com um comportamento próprio, se diferem em relação às suas frequências vibratórias.

Figura 48: Classificação da graxa branca com a azul como própria



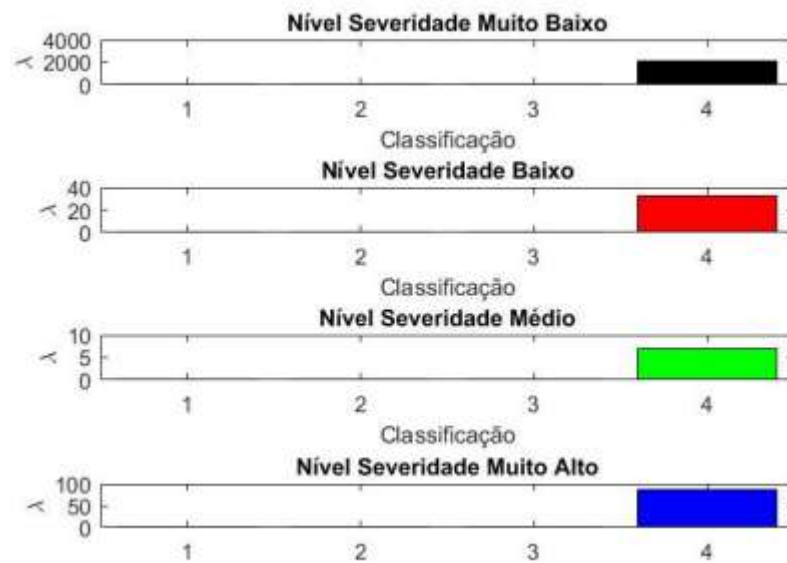
Fonte: O próprio autor, 2022.

Figura 49: Classificação da graxa LGQ01 com a azul como própria



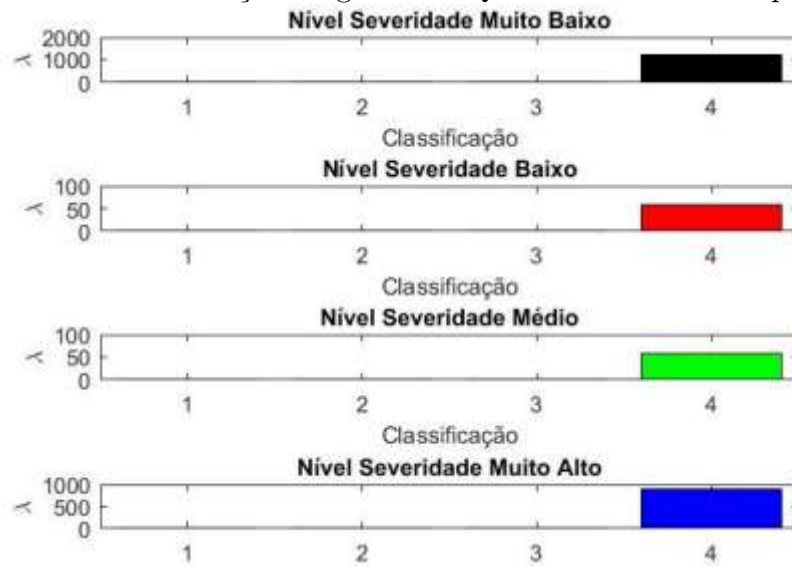
Fonte: O próprio autor, 2022.

Figura 50: Classificação da graxa LGQ02 com a azul como própria



Fonte: O próprio autor, 2022.

Figura 51: Classificação da graxa LGQ03 com a azul como própria



Fonte: O próprio autor, 2022.

Figura 52: Classificação da graxa LGQ04 com a azul como própria



Fonte: O próprio autor, 2022.

Figura 53: Classificação da graxa LGQ05 com a azul como própria



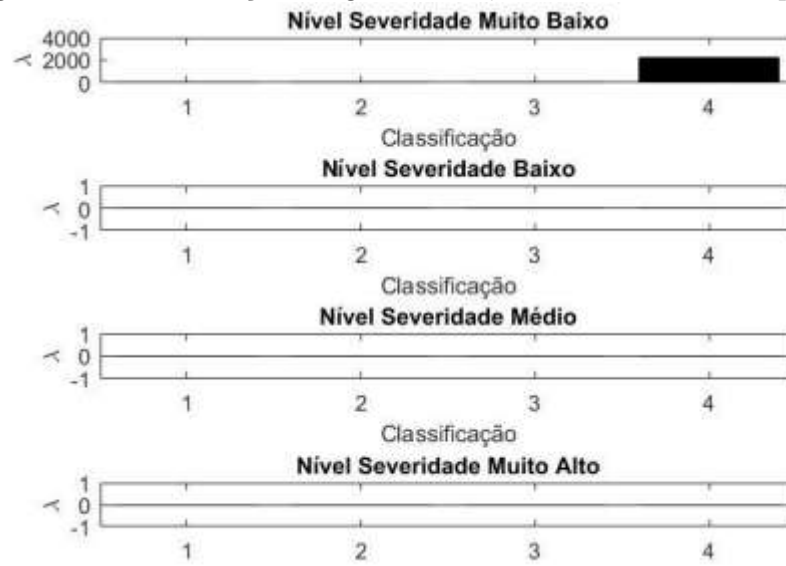
Fonte: O próprio autor, 2022.

Figura 54: Classificação da graxa LGQ06 com a azul como própria



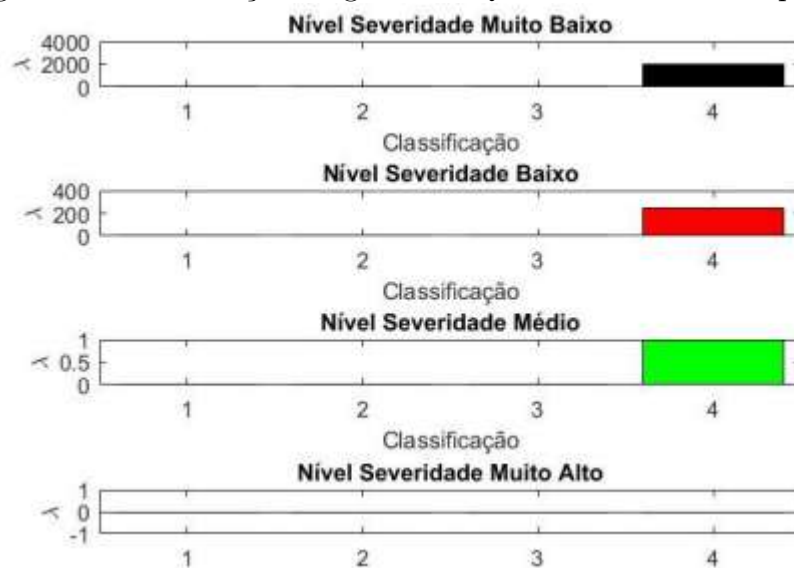
Fonte: O próprio autor, 2022.

Figura 55: Classificação da graxa LGQ07 com a azul como própria



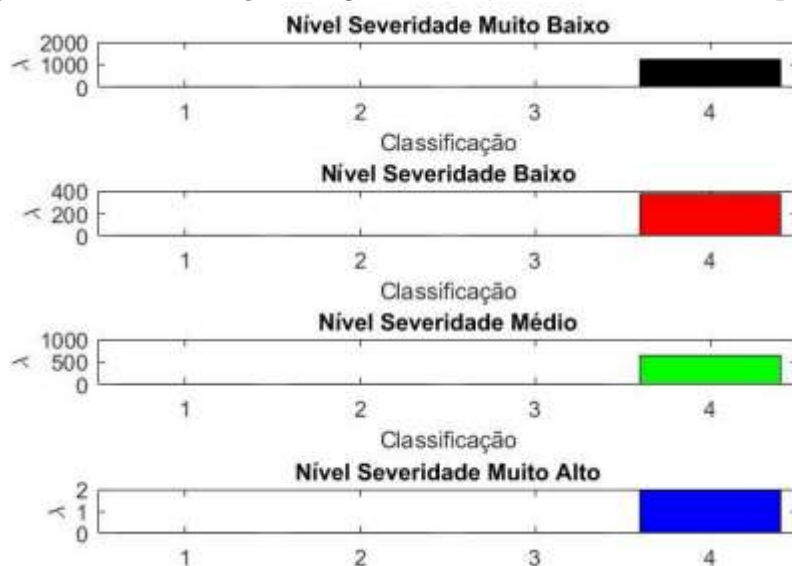
Fonte: O próprio autor, 2022.

Figura 56: Classificação da graxa LGQ08 com a azul como própria



Fonte: O próprio autor, 2022.

Figura 57: Classificação da graxa LGQ09 com a azul como própria



Fonte: O próprio autor, 2022.

Foi perceptível por meio da análise desses gráficos de classificação que os três grupos tiveram o mesmo comportamento vibracional, já que mesmo considerando graxas minerais diferentes entre si como sinais próprios, obtiveram-se os mesmos gráficos, ou seja, os mesmos resultados discutidos.

Um fato interessante, deveu-se ao comportamento da graxa branca como sinal não-próprio, pois obteve-se um nível de severidade Muito Baixo, por isso se assemelha ao comportamento da azul, mas não vice-versa, onde a azul como não-próprio proporcionou de Muito Baixo a Médio em questão da severidade.

5 Conclusão

Os resultados do experimento, num âmbito geral, se mostraram condizentes, visto que, com as análises foi possível comparar as graxas com as biograxas e também captar os sinais necessário para tratá-los com o algoritmo.

Os resultados demonstrados a partir do algoritmo de seleção negativa mostraram-se muito satisfatórios em relação aos ensaios realizados, onde pôde-se ver que as análises físico-químicas realizadas trouxeram respostas condizentes com os testes do algoritmo que analisavam o comportamento vibracional, isto demonstra a validade do método e que pode-se alimentar uma base de dados com esse objetivo classificatório.

As compreensões do SIA e das bases de monitoramento de integridade estrutural foram essenciais para a realização do trabalho, já que esses conceitos explicam o porquê de otimizar processos, tanto para fins ambientais quanto econômicos.

Notou-se que há um grande potencial para o aumento no uso dos lubrificantes vegetais, já que as que foram testadas, algumas tiveram ótimos comportamentos em relação às minerais. Foi perceptível que os grupos de óleos à base de lítio foram bem melhores do que à base de sódio, onde LGQ04 a 06 foram as melhores no total.

5.1 Dificuldades Encontradas

Escrever a revisão bibliográfica de um assunto que não é comentado na área de engenharia química, a tribologia foi uma das dificuldades encontradas, uma vez que vários dos livros estão em língua estrangeira e alguns são bem difíceis de encontrar, mas foi superada a partir de pesquisas mais aprofundadas e estudos sobre, o que forneceu um aprimoramento nos conhecimentos do idioma inglês e uma introdução a outras línguas também procuradas.

Apesar de não ser completamente apto com habilidades computacionais, o auxílio de meu orientador Fábio R. Chavarette foi fundamental para execução do SIA, por isso a sua programação acabou não sendo problemática. Por conta da revisão bibliográfica, não foi difícil entender a classificação gerada pelo algoritmo de seleção negativa.

Outra dificuldade foi quanto à instrumentação, onde foi necessário aprender sobre os equipamentos e como analisar os testes com atenção para minimizar os erros ao máximo, mas por meio da persistência e vontade de aprender foi possível ultrapassar esta barreira também.

Apesar de haverem outras dificuldades também envolvidas, com paciência, pesquisa e estudos foi possível superar todas, esse trabalho trouxe um crescimento pessoal e profissional próprio e trouxe o sentimento de dever cumprido.

6 Referências Bibliográficas

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM G99-17: Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus. WestConshohocken: ASTM International, 2017.

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

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

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

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

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.

CZICHOS, H.; HABIG, K.. Tribologia: Tribometrie, Tribomaterialien, Tribotechnik, Vieweg + Teubner Verlag, 2010.

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

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

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 UK: London, England, v. 10, n. 6, pp. 559-572, 2011.

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), 25th, 2019, Uberlândia Proceedings [...] Uberlândia: [s. n.], 2019.

GOW, G. Lubricating grease. In: MORTIER, R. M.; FOX, M. F.; ORSZULIK, S. T.(ed.). Chemistry and technology of lubricants. 3. ed. London: Springer, p. 411-432, p. 561, 2010.

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

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

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.

MANG, Theo et al. Enciclopédia de Lubrificantes e Lubrificação, Springer Verlag, 2014.

NOBARI, A. S.; ALIABADI, M. H. F. Vibration-Based Techniques for Damage Detection and Localization in Engineering Structures. Computational and Experimental Methods in Structures, World Scientific, v. 10, p. 1-39, 2018.

O que é tribologia na engenharia mecânica? Qual a sua importância na lubrificação?. Abecom, 2021. Disponível em: <https://www.abecom.com.br/tribologia/>. Acesso em: 3 de set. de 2021. PQ Index.

OELCHECK, 1991. Disponível em: <https://en.oelcheck.com/analyses/test-methods/pq-index/>. Acesso em: 9 de out. de 2021.

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-disk”. Cerâmica, São Paulo, v. 60, n. 355, p. 443–448, 2014.

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

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-contradisco. Science and Technology of the Materials. [s. l.], v. 18, p. 1-9, 2006.

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

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

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

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

YING, T. Artificial immune system: applications in computer security. New York:

Wiley; IEEE Computer Society, 208 p., 2016.

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, [s. l.], v. 82, p. 80-102, 2018.