

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA JÚLIO DE MESQUITA FILHO
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

MARCUS VINÍCIUS MAZARIN MARTINS

**AVALIAÇÃO DE BIO-GRAXAS E GRAXAS COMERCIAIS POR MEIO DE
ENSAIOS PIN ON DISK**

Ilha Solteira - SP

2025

MARCUS VINÍCIUS MAZARIN MARTINS

**AVALIAÇÃO DE BIO-GRAXAS E GRAXAS COMERCIAIS POR MEIO DE
ENSAIOS PIN ON DISK**

Trabalho de graduação apresentado à
Universidade Estadual Paulista (UNESP),
Faculdade de engenharia de Ilha Solteira, Ilha
Solteira - SP, para obtenção do título de Grau
acadêmico de Bacharel em Engenharia
Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Aparecido Carlos
Gonçalves

Ilha Solteira - SP

2025

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

Martins, Marcus Vinícius Mazarin.

M386a Avaliação de bio-graxas e graxas comerciais por meio de ensaios pin on disk
/ Marcus Vinícius Mazarin Martins. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2025
40 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Mecânica) -
Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira,
2025

Orientador: Aparecido Carlos Gonçalves

Inclui bibliografia

1. Bio-graxa. 2. Tribologia. 3. Análise de óleo. 4. Pino sobre disco. 5. Graxa mineral.

Elaborado por Raiane da Silva Santos - CRB: 8/9999



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Câmpus de Ilha Solteira

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE ENGENHARIA – CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
ATA DA DEFESA – TRABALHO DE GRADUAÇÃO

TÍTULO: AVALIAÇÃO DE BIO-GRAXAS E GRAXAS COMERCIAIS POR MEIO DE ENSAIOS PIN ON DISK

ALUNO: Marcus Vinícius Mazarin Martins RA: 191050131

Orientador: Prof. Aparecido Carlos Gonçalves

Aprovado (X) - Reprovado () pela Comissão Examinadora
Nota obtida: 7,5 (sete e meio)

Comissão Examinadora:

Prof. Aparecido Carlos Gonçalves
Presidente (Orientador)

Documento assinado digitalmente
gov.br ANDRÉ YUDI LIMA OKAMOTO
Data: 05/02/2025 10:13:26-0300
Verifique em <https://validar.j6.gov.br>

Engenheiro: André Yudi Lima Okamoto

Documento assinado digitalmente
gov.br ESTÊNIO FUZARO DE ALMEIDA
Data: 05/02/2025 10:10:15-0300
Verifique em <https://validar.j6.gov.br>

Engenheiro: Estênio Fuzaro de Almeida

Documento assinado digitalmente
gov.br MARCUS VINÍCIUS MAZARIN MARTINS
Data: 05/02/2025 10:10:15-0300
Verifique em <https://validar.j6.gov.br>

Assinatura do Aluno

Ilha Solteira (SP) 05 de fevereiro de 2025

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente à Deus por toda a minha trajetória acadêmica. À minha família pelas oportunidades que me proporcionaram e aos apoios que me deram. Gostaria de agradecer também, ao professor Aparecido pelas oportunidades de trabalhar com ele no laboratório de tribologia, e ao CNPq, pela concessão de bolsa de iniciação científica PIBIC (Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica).

Resumo

Por anos a utilização do petróleo e seus derivados é difundida na sociedade, grande parte dos lubrificantes usados são de origem mineral. Porém, com o futuro esgotamento das reservas petrolíferas, não renováveis, e a difícil biodegradabilidade de seus compostos faz-se necessário a busca por outras alternativas. As bio-graxas, são uma alternativa para a resolução desses impasses, uma vez que apresentam alta taxa de degradação, são atóxicas e são provenientes de fontes renováveis. Essas como qualquer composto de uso comercial, devem atender requisitos mínimos para satisfazer regulamentações ambientais e conservação da natureza, e também substituir as de origem mineral. Assim, torna-se necessária a análise comparativa, através da análise do lubrificante e dos desgastes dos pinos e discos, das graxas sintetizadas. O professor Dr. Nelson Roberto Antoniosi Filho, da universidade federal de Goiás, UFG, está patenteando, graxas sintetizadas à base de soja. Assim, a execução deste projeto visa garantir a viabilidade técnica e comercial desses importantes bioprodutos. Para isto, foram efetuados ensaios de performance em lubrificação via desgastes dos pinos e dos discos do equipamento PIN ON DISK. Também foram efetuadas análises de contagem de Partículas Magnéticas como ferramentas auxiliares na análise de performance. Para realizar a análise das graxas, utiliza-se uma máquina PIN ON DISK, a qual realizará a rotação de um disco em um recipiente que será preenchido por graxa e atritará com um pino, ambos de aço SAE 1040. Com o intuito de comparar o comportamento das graxas em diferentes situações, insere-se também à máquina cargas, as quais alterarão o comportamento vibracional do sistema, assim como a alteração da velocidade entre os ensaios. Para uma substituição eficaz da graxa azul, a afinidade vibracional das graxas analisadas deve ser maior do que 75%. Porém, esse limiar não foi alcançado para as bio-graxas LGQ02 e LGQ03 em alguns ensaios. Após cada ensaio, com as graxas coletadas, deve-se inseri-las em um monitor automático de partículas (PQA). Notou-se que os índices PQ apresentam uma discrepância com os índices obtidos para a graxa mineral azul, apresentando um maior desgaste, assim, a graxa LGQ01 também não apresentou o seu comportamento, analisado pelos testes de vibração e PQA, próximo da graxa mineral. Portanto, conclui-se que as bio-graxas analisadas não apresentam o comportamento próximo ao da graxa mineral azul. Porém, apesar de não validadas, os testes e análises realizados não invalidam as propriedades tribológicas das bio-graxas, e nem descartam o seu uso. Slavec (2020), realizou testes similares para o mesmo grupo de graxas em comparação às graxas comerciais, os resultados obtidos por ele corroboram que as graxas LGQ01, LGQ02 e LGQ03 não apresentaram resultados satisfatórios. Ele também avalia outro grupo de bio-graxas, à base de lítio, e obtém resultados satisfatórios. Concluindo assim, que o espessante apresenta forte influência no desempenho das bio-graxas, e que através de possíveis modificações químicas, como aditivos por exemplo, possam adquirir melhores propriedades e ter uma melhor performance.

Palavras-chave: Bio-graxa. Tribologia. Análise de óleo. Pino sobre disco. Graxa mineral.

Abstract

For years, the use of oil and its derivatives has been widespread in society, and most of the lubricants used are of mineral origin. However, with the future extinction of non-renewable oil reserves and the difficult biodegradability of its compounds, it is necessary to look for other alternatives. Bio-greases are an alternative for resolving these impasses, since they have a high degradation rate, are non-toxic and come from renewable sources. Like any compound for commercial use, they must meet minimum requirements to satisfy environmental regulations and nature conservation, and also replace those of mineral origin. This makes it necessary to carry out a comparative analysis of the synthesized greases, by analyzing the lubricant and the wear on the pins and discs. Professor Dr. Nelson Roberto Antoniosi Filho, from the Federal University of Goiás, UFG, is patenting synthesized soy-based greases. The purpose of this project is to ensure the technical and commercial viability of these important bioproducts. To this end, lubrication performance tests were carried out via wear on the pins and disks of the PIN ON DISK equipment. Magnetic particle count analysis was also carried out as an auxiliary tool in performance analysis. To carry out the grease analysis, a PIN ON DISK machine will be used, which will rotate a disk in a container that will be filled with grease and will wear against a pin, both made of SAE 1040 steel. In order to compare the behavior of the greases in different situations, loads are also added to the machine, which will alter the vibrational behavior of the system, as well as changing the speed between tests. For the blue grease to be effectively replaced, the vibrational affinity of the greases analyzed must be greater than 75%. However, this level was not reached for the bio-greases LGQ02 and LGQ03 in some tests. After each test, with the greases collected, they should be inserted into an automatic particle monitor (PQA). It was noted that the PQ indices showed a discrepancy with the indices obtained for the blue mineral grease, showing greater wear, while the LGQ01 grease also did not show behavior close to the mineral grease, as analyzed by the vibration and PQA tests. Therefore, it can be concluded that the bio-greases analyzed do not behave in the same way as blue mineral grease. However, although not validated, the tests and analyses carried out do not invalidate the tribological properties of bio-greases, nor do they exclude their use. Slavec (2020) carried out similar tests for the same group of greases compared to commercial greases, and the results he obtained corroborate that the LGQ01, LGQ02 and LGQ03 greases did not present satisfactory results. He also evaluated another group of lithium-based bio-greases and obtained satisfactory results. He concludes that the thickener has a strong influence on the performance of bio-greases, and that through possible chemical modifications, such as additives, they can acquire better properties and perform better.

Keywords: Bio-grease. Tribology. Oil analysis. Pin on disk. Mineral grease.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Equipamentos para a medição do número de consistência de graxas	21
Figura 2 - Diagrama de funcionamento do Algoritmo de seleção negativa	24
Figura 3 - PIN ON DISK	26
Figura 4 - Acelerômetro MPU6050	27
Figura 5 - Geometria do pino e do disco	28
Figura 6 - Inserção de carga no PIN ON DISK	29
Figura 7 – Monitor automático de partículas (PQA).....	31

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Números de consistência NLGI	21
Tabela 2 – Ensaio realizado nas amostras de graxa.....	29
Tabela 3 – Informações sobre as graxas utilizadas	30
Tabela 4 – Afinidades vibracionais das graxas	32
Tabela 5 - Dados obtidos com os índices PQ	33
Tabela 6 - Erro percentual entre o índice PQ da graxa LGQ01 e a graxa padrão	34
Tabela 7 - Parâmetros definidos para os experimentos.....	34
Tabela 8 - Descrição dos lubrificantes	35
Tabela A. 1 - Índices PQ obtidos	40

Sumário

Resumo	6
Abstract	7
1. Introdução	11
2. Objetivo	12
3. Revisão bibliográfica	13
3.1 Manutenção	13
3.2 Tribologia.....	14
3.3 Atrito e desgaste.....	15
3.4 Lubrificação	15
3.4.1 Lubrificantes líquidos	15
3.4.2 Lubrificantes pastosos	17
3.5 Análise de lubrificantes.....	22
4. Sistema Imunológico Artificial (SIA)	23
4.1 Algoritmo de Seleção Negativa	24
5. Materiais e métodos.....	26
6. Resultados e discussão	32
7. Conclusão	36
8. Referências	37
9. Apêndice	40
9.1 Apêndice A	40

1. Introdução

Por anos a utilização do petróleo e seus derivados é difundida na sociedade, uma vez que esses apresentam um alto valor energético, baixo custo e atributos que permitem o desenvolvimento dos processos tecnológicos. Com os óleos lubrificantes e graxas não é diferente, pois grande parte dos lubrificantes usados são de origem mineral.

Porém, com o futuro esgotamento das reservas petrolíferas, não renováveis, e a difícil biodegradabilidade de seus compostos faz-se necessário a busca por alternativas que possam contornar esses problemas e apresentem atributos semelhantes para que se possa dar continuidade no avanço tecnológico.

Enquanto as graxas minerais possuem alta estabilidade térmica e são amplamente empregadas na indústria devido à sua resistência à oxidação e degradação, elas também apresentam sérios impactos ambientais e riscos à saúde humana devido à presença de compostos tóxicos. Esses compostos podem contaminar o solo e os recursos hídricos, além de representarem perigo para os trabalhadores que lidam diretamente com esses produtos.

As bio-graxas, por sua vez, oferecem uma solução mais ecológica, com menor impacto ambiental e biodegradabilidade superior, tornando-se uma opção mais segura para o meio ambiente e para a saúde humana. No entanto, ainda enfrentam desafios significativos, especialmente em relação à estabilidade oxidativa, que pode comprometer sua durabilidade e eficácia em aplicações de longo prazo. Além disso, seu desempenho em condições extremas de temperatura e pressão ainda é um aspecto crítico, pois em algumas situações essas graxas podem apresentar menor resistência ao desgaste e às cargas mecânicas intensas. Assim, a melhoria de suas propriedades tribológicas é um fator essencial para viabilizar sua substituição completa e garantir um desempenho equiparável ou superior ao das graxas minerais, possibilitando sua adoção em larga escala pela indústria.

As graxas de origem vegetal, como qualquer composto de uso comercial, devem atender requisitos mínimos para satisfazer regulamentações ambientais e conservação da natureza, e também substituir as de origem mineral. Assim, por preocupações ambientais e políticas, recrudesce o enfoque nas pesquisas de lubrificantes de origem vegetal e os mesmos vem ganhando mais espaço nas indústrias.

O professor Dr. Nelson Roberto Antoniosi Filho, da universidade federal de Goiás, UFG, sintetizou e patenteou bio-graxas à base de óleo de soja, essas graxas necessitavam ser analisadas para que possam ser utilizadas comercialmente. Para isto, devem apresentar comportamento tribológico próximo ao de graxas comerciais, graxas minerais.

2. Objetivo

Análise comparativa, através de análise de vibração e dos desgastes dos pinos e discos, das bio-graxas sintetizadas em comparação às graxas comerciais de origem mineral.

3. Revisão bibliográfica

3.1 Manutenção

Sistemas e equipamentos mecânicos estão sujeitos à falhas por deterioração, essas falhas impedem o funcionamento ideal destes sistemas mecânicos. Falhas repentinas podem acarretar em paradas inesperadas nos processos produtivos, gerando assim grandes perdas (CUNHA, 2005; LAGO, 2007). Para que não ocorram perdas ou essas sejam minimizadas, é necessário que os equipamentos sejam mantidos em condições normais de funcionamento usando-se ações técnicas para conservar ou restaurar determinado equipamento mecânico, e este possa exercer a função requerida de forma correta, ou seja, assegurar o serviço que esse desempenha. A utilização dessas técnicas é conhecida como manutenção (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT, 1994; ARATO JÚNIOR, 2004).

Existem três tipos de manutenções, a corretiva, a preventiva e a preditiva, sendo a primeira uma medida curativa, onde o equipamento só é restaurado após a quebra de algum componente o que resulta em altos custos de manutenção para equipamentos mais antigos, estoques de peças e paradas inesperadas. Já o segundo tipo, manutenção preventiva, utiliza-se de intervenções e inspeções constantes, pré-definidas, baseando-se em dados de fabricantes, conhecimento técnico e dados estatísticos. Sendo que a manutenção preventiva aumenta o custo de produção devido às paradas necessárias e pode induzir avarias devido à montagens e desmontagens frequentes no equipamento, porém aumenta a produtividade já que as paradas são pré-definidas (ARATO JÚNIOR, 2004). O último tipo, a manutenção preditiva, se baseia em testes não destrutivos para avaliar parâmetros que indiquem o mau funcionamento do sistema, assim, estima-se a evolução desses parâmetros e agenda-se a parada para manutenção do sistema mecânico (ARATO JÚNIOR, 2004). Este tipo de manutenção proporciona aumento de produtividade e diminuição das intervenções no equipamento, porém exige equipamentos para a análise e coleta dos dados sobre o sistema mecânico em questão e também conhecimento técnico especializado.

Para a avaliação dos parâmetros do sistema na manutenção preditiva, frequentemente utiliza-se sistemas especialistas, análise de vibrações e análise de lubrificantes. Os sistemas especialistas, são softwares que utilizam o processamento de informações, para evitar a sequência rígida de trabalho das soluções algorítmicas por parte do homem (SLAVEC, 2020).

A análise de vibrações, se baseia que a frequência de vibração do sistema deve ser igual a frequência de excitação dos esforços dinâmicos, e que com a deterioração da frequência de excitação, a frequência de vibração sofre um aumento brusco. Já a análise de lubrificantes, consiste na contaminação do lubrificante em componentes lubrificados, assim, consegue-se monitorar o desgaste do componente por meio da taxa de contaminação do fluido lubrificante e verificar o mau funcionamento do sistema (ARATO JÚNIOR, 2004).

3.2 Tribologia

A tribologia é o estudo do atrito entre os corpos em movimento, envolvendo a mecânica, a física, a química, a ciência dos materiais e conhecimentos em lubrificação (LUDEMA, 1996; ZAINAL et al, 2018). Sendo que um tribossistema é composto por quatro elementos, um corpo sólido, um contra-corpo, um elemento interfacial, que são os lubrificantes e/ou contaminantes, e o ambiente (GAHR, 1987; MANG e DRESEL, 2007).

As características de um sistema tribológico são: a dureza do material, a rugosidade da superfície, a geometria de contato e o mecanismo de deslizamento. Assim, as características de um sistema tribológico influenciam nas características do filme de lubrificante e no comportamento do sistema tribológico (CHAN et al., 2018; SLAVEC, 2020).

O desempenho de um sistema tribológico é fortemente dependente das características do lubrificante deste sistema, propriedades físicas e triboquímicas. Já na proteção ao desgaste e a capacidade de carga, os responsáveis são os aditivos do lubrificante (CHAN et al., 2018).

A interação entre duas superfícies resulta em dissipação de energia, devido ao atrito, sendo na forma de calor e ruído. Nessa interação, podem ocorrer mudanças no material das superfícies, rugosidade, propriedades físicas e/ou remoção de material (STOETERAU, 2004). Vale ressaltar, que a remoção de material, desgaste, causada pelo atrito nem sempre é algo ruim para o sistema, já que há situações onde o atrito é desejado, como por exemplo em freios de automóveis.

- **Tribômetro**

Ensaaios tribológicos são amplamente utilizados para auxiliar na manutenção preditiva e na análise de novos materiais, assim, deve-se utilizar tribômetros para realizar esses ensaios (BHUSHAN, 2013; YING; YUPENG, 2017). Um tribômetro frequentemente utilizado para avaliar o desgaste por deslizamento entre pares de materiais é o pino/esfera sobre disco (pin/ball on disk) (BAYER, 2004). Sendo que o pin on disk é referenciado por apresentar os melhores estudos de desgaste dos materiais e atrito, e apresentar melhor reprodutibilidade dos ensaios (RAMOS et al., 2014).

Os ensaios no pin on disk são regidos segundo a norma americana ASTM G99: Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus, onde os parâmetros de controle são a carga, a velocidade, a distância, a temperatura do pino e/ou disco e as variáveis do ambiente, como temperatura, umidade relativa e etc.

Para a realização do ensaio pin on disk, o pino deve ser pressionado por uma carga no disco, exercendo uma força normal. Os resultados são obtidos executando ensaios para uma determinada distância de deslizamento, carga e velocidade, sendo que esta pode variar entre 60 e 600 rotações por minuto (ASTM, 2017).

Logo, o tribômetro permite estudar o atrito e o comportamento do desgaste dos materiais variando-se tempo, distância, pressão de contato (força normal aplicada), velocidade, temperatura, umidade relativa e o lubrificante (SLAVEC, 2020).

3.3 Atrito e desgaste

O atrito é a força que ocorre entre duas superfícies em movimento relativo de deslizamento ou rolamento, sendo esta contrária ao movimento, responsável por dificultar ou impedir o movimento. Porém, o atrito não é uma propriedade do material, mas sim uma resposta do comportamento do sistema tribológico, assim, o atrito é descrito pelo coeficiente de atrito, razão entre a força de atrito e a força normal aplicada ao corpo (BHUSHAN, 2013).

Em conjunto ao atrito está o desgaste, principal responsável pela substituição de componentes em sistemas mecânicos, perda de eficiência e gastos com lubrificantes (RAMOS et al., 2014). O desgaste é resultado entre interações mecânicas ou químicas de duas superfícies, sendo que este acarreta em perda de material ou danos às superfícies (MANG; DRESEL, 2007; BHUSHAN, 2013).

Segundo Chan et al. (2018) existem três tipos de desgaste relacionados ao movimento relativo entre superfícies, são o desgaste por abrasão, adesão e fadiga. O desgaste abrasivo é causado por asperidades duras na superfície que removem material da outra superfície. O desgaste adesivo é causado pela deformação plástica dos materiais e forte ligação de suas superfícies. O desgaste por fadiga é o enfraquecimento das superfícies devido à altas tensões cíclicas.

3.4 Lubrificação

Devido ao atrito causado pelo movimento relativo entre superfícies, utiliza-se substâncias para diminuir essa força contrária ao movimento, essas substâncias são conhecidas como lubrificantes, podendo ser líquidos, sólidos ou pastosos (KHONSARI; BOOSER, 2017). Por isso, os lubrificantes têm a função de reduzir e controlar o atrito e o desgaste de componentes mecânicos, além de refrigerar, limpar, prevenir corrosão e etc (MANG; DRESEL, 2007; BHUSHAN, 2013). Assim, estes aumentam a vida útil e a eficiência de componentes mecânicos desde que sejam escolhidos de forma correta para aplicação desejada.

3.4.1 Lubrificantes líquidos

O óleo lubrificante é constituído de um óleo base e produtos químicos altamente especializados para atender diversos requisitos de desempenho (KUMAR; MISHRA; MUKHERJEE, 2005). O óleo base contribui com características fundamentais específicas,

enquanto os aditivos conferem características adicionais ao produto final (MANNEKOTE et al., 2018).

Segundo a Agência Nacional do Petróleo (ANP), os óleos lubrificantes são subdivididos de acordo com a sua base de formulação: óleos minerais, óleos graxos, óleos sintéticos, óleos compostos e óleos aditivados (BRASIL, 2020). Sendo os aditivados compostos por outro tipo de óleo e aditivos que têm como objetivo reforçar a ação de outras propriedades do óleo (ABDULBARI; AKINDOYO; MAHMOOD, 2015; BRASIL, 2020).

Os óleos lubrificantes apresentam faixas de tolerância para as suas especificações, porém selecionar corretamente o óleo lubrificante não significa necessariamente um bom desempenho, pois somente a aplicação garante a performance do óleo. Ainda que haja ensaios laboratoriais, estes não garantem o desempenho em serviço (CARRETEIRO; BELMIRO, 2006).

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

A análise de alterações nas propriedades físico-químicas do óleo ajuda a estimar a extensão da degradação em suas propriedades, tais como viscosidade, acidez, teor de água, grau de oxidação, entre outros, além de fornecer informações importantes sobre a condição do óleo, bem como da máquina. Alterações indesejáveis nestas propriedades podem afetar o desempenho e levar à falha dos componentes mecânicos (KUMAR; MISHRA; MUKHERJEE, 2005).

Para que os óleos lubrificantes possam exercer sua função de maneira eficaz, é essencial compreender as propriedades que determinam seu desempenho. Dentre essas propriedades, a viscosidade e o índice de viscosidade se destacam como fatores cruciais. Assim, o entendimento e o controle desses parâmetros são essenciais para garantir a eficiência, a durabilidade e a segurança dos sistemas mecânicos em diversas aplicações industriais e automotivas.

• Viscosidade

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

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

Assim, a viscosidade é considerada a propriedade mais importante dos óleos lubrificantes. Pode ser expressa em termos de viscosidade dinâmica (absoluta), cuja unidade de

medida é o (Pa.s) ou (P) (Poise), ou viscosidade cinemática, geralmente expressa em ($mm^2 \cdot s^{-1}$) ou (cSt) (centiStokes) (BHUSHAN, 2013; KHONSARI; BOOSER, 2017).

- **Índice de viscosidade**

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

3.4.2 Lubrificantes pastosos

Graxas lubrificantes são um dos principais tipos de lubrificantes utilizados em máquinas (MAKSIMOVA et al., 2018). Sendo que estas apresentam diversas funcionalidades como vedação, inibidor de corrosão, amortecedor e supressor de ruídos (GOW, 2010).

Segundo Boner (1954), a definição de graxa mudou ao longo do tempo. A definição original utilizada era uma combinação sólida ou semi-sólida de derivados de petróleo e sabão ou misturas de sabão, com ou sem aditivos sólidos adequados para uso em certos tipos de lubrificação. À medida que os tipos de graxa existentes evoluíram, a definição mais completa é um lubrificante sólido ou semifluido composto por um espessante e um lubrificante líquido, que pode conter outros ingredientes para adicionar propriedades especiais.

Porém, para Carreteiro e Belmiro (2006), as graxas podem ser definidas como uma combinação entre um fluido lubrificante e um espessante, para assim obter um semi-sólido com ótima lubricidade (CARRETEIRO; BELMIRO, 2006).

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

O fato de as graxas serem semi-sólidos, dispensam a necessidade de reservatórios e apresentam também os benefícios de um lubrificante sólido, manter a estrutura do corpo, e a lubrificação de um lubrificante líquido (HONARY; RICHTER, 2011).

• Composição

A graxa normalmente é composta pelo fluido base, o espessante e os aditivos (ABDULBARI; AKINDOYO; MAHMOOD, 2015). O óleo base realiza a lubrificação real, o espessante confere o comportamento reológico e tribológico adequado à graxa, fornecendo uma fase sólida contínua. Já os aditivos têm como função realçar algumas propriedades da graxa, como oxidação, desgaste, lubrificação ou fricção (GANGULE; DWIVEDI, 2001; NAGENDRAMMA; KUMAR, 2015).

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

O óleo utilizado no preparo da graxa é selecionado de acordo com as características similares, como se o mesmo fosse utilizado sozinho no mecanismo a ser lubrificado. A viscosidade do óleo base oscila entre 65 e 175 cSt (centiStokes), a 40°C. Os óleos de baixa viscosidade são utilizados em graxas para temperaturas baixas e velocidades altas, enquanto que os de alta viscosidade para condições de baixas velocidades, altas cargas e impacto. A relação viscosidade-temperatura do óleo base é importante para as condições de operação onde há mudanças de temperatura (AGUILLON, 1993).

Segundo Cousseau (2009) o espessante é geralmente constituído por um sabão metálico, obtido por uma reação química (esterificação) entre um composto básico e um lipídio. O metal utilizado para a fabricação do sabão é referenciado na caracterização da graxa. Assim, quando se trata de uma graxa de lítio, significa que o sabão utilizado como espessante foi obtido através da esterificação de ácidos graxos com hidróxido de lítio. Embora menos frequentes, podem ser utilizados espessantes não saponíficos, como argila bentonita e ureia.

Já os aditivos, Segundo Rudnick (2009), podem funcionar por meio de interações físicas e químicas. Alguns aditivos permanecem inalterados quando o lubrificante é utilizado e outros podem sofrer degradação durante o uso, outros ainda devem sofrer alterações químicas durante o uso. Eles são largamente utilizados em diversos tipos de indústrias, incluindo alimentícias, de sabões e detergentes, farmacêutica, de tintas, plásticos, combustíveis e automotivas.

Rudnick (2009), afirma que alguns critérios devem ser levados em consideração para a escolha de um componente químico como aditivo:

- Solubilidade: A solubilidade no óleo base utilizado na fabricação da graxa;
- Estabilidade: Para garantir desempenho aceitável sobre a vida útil do produto lubrificante;
- Volatilidade: Baixa volatilidade é geralmente necessário para a maioria das aplicações de lubrificantes industriais;

- **Compatibilidade:** Os aditivos devem ser compatíveis com outros componentes do sistema;
- **Odor:** Deve ser aceitável para aplicações em particular, especialmente em processamento de alimentos;
- **Atividade:** O aditivo deve possuir atividade funcional durante o tempo de vida da aplicação;
- **Compatibilidade ambiental:** Biodegradabilidade do aditivo, gerenciamento do resíduo e toxicidade;
- **Saúde e segurança:** Relacionada aos seres humanos que possuírem contato com aditivos tanto na forma de matérias-primas, como componentes do produto final.

- **Fabricação**

Existem dois processos para a fabricação de graxas, formar o sabão na presença do óleo ou dissolver o sabão, produzido separadamente, no óleo (CARRETEIRO; BELMIRO, 2006). As graxas podem ser classificadas como, graxas simples (à base de sabão), graxas complexas (sabão-sal) e graxas sem sabão (HONARY; RICHTER, 2011).

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

- **Estrutura**

A estrutura das graxas se assemelha à uma esponja embebida por água, sendo que a água representa o fluido refrigerante e a esponja o espessante (GOW, 2010). A matriz do sabão desempenha um papel análogo à um reservatório de óleo, e fornece os lubrificantes e os aditivos no ponto de contato (CARRETEIRO; BELMIRO, 2006).

Para que as graxas lubrificantes possam atender adequadamente às exigências operacionais, é essencial compreender e avaliar suas principais propriedades. Dentre elas, o

número de consistência (NLGI) e o ponto de gota se destacam como fatores determinantes na escolha e aplicação desses lubrificantes. A compreensão dessas propriedades é essencial para garantir a seleção eficiente da graxa correta, otimizando o desempenho e aumentando a vida útil dos equipamentos lubrificados.

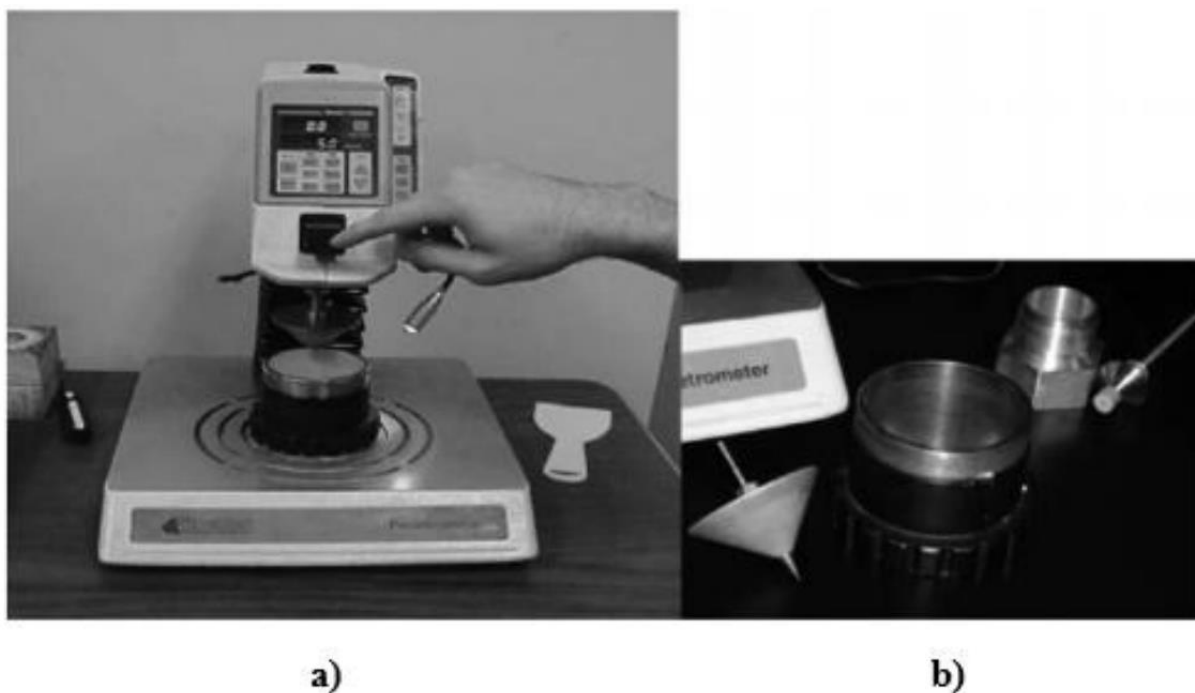
- **Número de consistência (NLGI)**

Como as graxas são substâncias semi-sólidas estas não apresentam viscosidade, já que a matriz da graxa é mantida unida por forças internas, as quais conferem a característica de sólido quando aplicada uma deformação. Essa rigidez é denominada consistência. A consistência é a propriedade mais importante das graxas, representando a diferença entre um óleo lubrificante e uma graxa (GOW, 2010).

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

A consistência das graxas é definida por um método padrão da norma ASTM D 217, sendo classificada de acordo com o sistema NLGI, estabelecido pela National Lubricating Grease Institute (GOW, 2010). Utiliza-se um equipamento denominado penetrômetro para avaliar o número de consistência de uma graxa, onde um objeto padrão com formato cônico penetra uma amostra de graxa em condições padrões. A profundidade da penetração caracteriza o número de consistência da graxa, assim, graxas mais espessas apresentam altos números de consistência e o contrário também é válido para graxas menos espessas (GOW, 2010; HONARY; RICHTER, 2011).

A Figura 1, a seguir, apresenta o equipamento e os seus componentes utilizados na medição do número de consistência de uma graxa, onde “a” é um penetrômetro e “b” um copo para graxa e corpo cônico padrão.

Figura 1 - Equipamentos para a medição do número de consistência de graxas

Fonte: Honary e Richter (2011)

A Tabela 1 mostra a classificação do grau NLGI a partir da penetração trabalhada, quanto maior o grau de NLGI mais espessa é a graxa (Honary e Richter, 2011).

Tabela 1 – Números de consistência NLGI

Grau NLGI	Penetração trabalhada (1/10 mm)
000	445 – 475
00	400 – 430
0	355 – 385
1	310 – 340
2	265 – 295
3	220 – 250
4	175 – 205
5	130 – 160
6	85 – 115

Fonte: Honary e Richter (2011)

- **Ponto de gota**

O ponto de gota é outra propriedade fundamental das graxas, tal propriedade indica a temperatura a qual a graxa passa do estado pastoso (semi-sólido) para o estado líquido,

apresentado a primeira gota. Assim, esta propriedade auxilia na escolha das graxas para cada aplicação (CARRETEIRO; BELMIRO, 2006). Já que, um ponto de gota elevado, apesar de não ser um fator para prever a temperatura máxima de operação, é um sinal da temperatura máxima de pico à qual a graxa pode ser exposta por um período breve, sem liberar óleo em excesso, o que pode diminuir drasticamente a durabilidade da graxa e até mesmo prejudicar a aplicação a longo prazo.

3.5 Análise de lubrificantes

A análise de lubrificantes é baseada na contaminação do lubrificante, pois os componentes mecânicos contaminam o lubrificante com partículas sólidas, assim, pode-se identificar o mau funcionamento do sistema e sua origem analisando o material e a dimensão das partículas e a taxa de contaminação do lubrificante (ARATO JÚNIOR, 2004).

Identificar a origem das partículas é importante para saber qual componente mecânico está sendo monitorado. Além disso, as dimensões do particulado auxilia na caracterização dos diferentes níveis de desgaste (ARATO JÚNIOR, 2004). Assim, a análise de lubrificantes permite avaliar o desgaste de componentes mecânicos sem que estes sejam retirados de seus sistemas.

Uma técnica de análise de lubrificantes é a ferrografia, técnica de manutenção preditiva que consiste na determinação da severidade e tipo de desgaste por meio das partículas presentes em óleos ou graxas lubrificantes (LAGO, 2007). As partículas são analisadas quanto à sua morfologia, acabamento superficial, coloração, natureza e tamanho. Assim, a análise ferrográfica é classificada em dois tipos, a quantitativa, que quantifica a concentração de partículas em suspensão no lubrificante, e a qualitativa, que analisa a morfologia dessas.

Outra técnica para analisar os lubrificantes é a microscopia, onde se analisa as partículas de desgaste presente no lubrificante. Um tipo de microscopia empregado nesse tipo de análise é a microscopia ótica, a qual utiliza princípios físicos de ampliação por meio de lentes ópticas. Esse tipo de microscopia permite obter informações sobre o contorno e a coloração das partículas presentes no lubrificante (TOMS, 1995).

Outro tipo de microscopia é a eletrônica por varredura, onde feixes de elétrons são usados para escanear a superfície das partículas. Obtendo-se imagens de alta resolução com grandes ampliações. Porém, este tipo de microscopia gera imagens eletronicamente, não é possível visualizar e diferenciar as partículas pela sua coloração, apresenta um processo de análise demorado e de alto custo (TOMS, 1995).

A espectroscopia é outra técnica empregada na análise de lubrificantes, sendo que esta estuda as interações da radiação com a matéria. Sua análise se baseia na medida da quantidade de radiação produzida ou absorvida pelas moléculas ou pelas espécies atômicas de interesse (SKOOG et al., 2006, 2014).

Por exemplo, ao utilizar a fluorescência os átomos ou moléculas são excitados por absorção de radiação eletromagnética. Assim, o analito, substância ou componente químico, sairá de um estado de menor energia para um estado de maior energia. Ao retornar para o seu

estado fundamental (estado de menor energia), este emitirá radiação magnética que ao ser medida possibilitará o conhecimento de diversas informações sobre o analito (SKOOG et al., 2006, 2014). Sendo possível por meio desta técnica determinar os elementos químicos contidos nas partículas de desgaste e localizar os componentes de máquina que sofreram algum mecanismo de desgaste.

4. Sistema Imunológico Artificial (SIA)

De acordo com Dasgupta (1999), os sistemas imunológicos artificiais (SIA) surgiram como tentativas de modelar e aplicar princípios imunológicos na criação de novas ferramentas computacionais. Eles já são aplicados em várias áreas, incluindo reconhecimento de padrões, identificação de falhas e anomalias, segurança da computação, otimização, controle, robótica, análise de dados e aprendizado de máquina, entre outras.

Os sistemas imunológicos artificiais são ferramentas computacionais que utilizam métodos inteligentes, inspirados no sistema imunológico natural, para resolver questões do cotidiano (Dasgupta, 1999).

No campo da engenharia e da computação, há um crescente interesse na análise dos sistemas imunológicos, principalmente por sua habilidade de processar informações. Do ponto de vista da engenharia, há várias características do sistema imunológico (SI) que podem ser destacadas:

Unicidade: Cada animal possui seu próprio sistema imunológico, com suas capacidades e vulnerabilidades particulares;

Reconhecimento de padrões internos e externos ao sistema: As células e moléculas que não pertencem ao organismo são reconhecidas e eliminadas pelo SI;

Deteção de anomalia: O SI pode detectar e reagir a agentes patogênicos (causadores de anomalias) a que o organismo nunca havia sido exposto anteriormente;

Deteção imperfeita: Um reconhecimento perfeito não é necessário para que o SI reaja contra um elemento causador de patologia (patógeno);

Diversidade: Existe uma quantidade limitada de células e moléculas no SI que são utilizadas para se obter o reconhecimento de um número praticamente infinito de elementos, incluindo aqueles sintetizados em laboratório;

Aprendizagem por reforço: A cada encontro com o mesmo patógeno, o sistema imunológico melhora a qualidade de sua resposta;

Memória: Os componentes do SI bem sucedidos no reconhecimento e combate às patologias são armazenados para uma resposta futura mais intensa e efetiva.

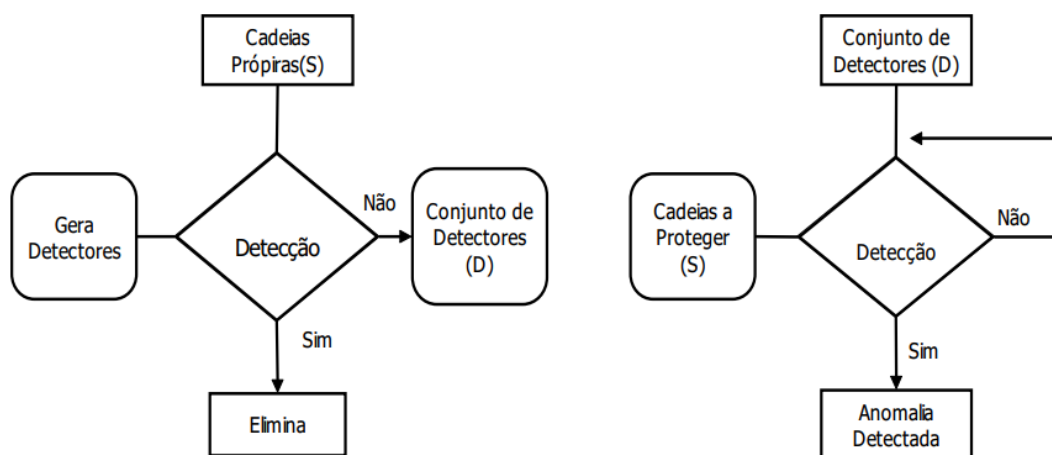
4.1 Algoritmo de Seleção Negativa

O algoritmo de seleção negativa (NSA) (Forrest et al., 1994) é inspirado no mecanismo utilizado pelo sistema imunológico para treinar células T, células do sistema imunológico. Tais células são treinadas para reconhecer antígenos (não-próprio) e para evitar que reconheçam as próprias células do corpo (próprio). A ideia é gerar um conjunto de detectores (binários), primeiramente criando candidatos de modo aleatório e, então, descartando aqueles que reconhecem os dados de treinamento relacionados ao próprio. Estes detectores podem ser usados posteriormente para detecção de anomalias.

Na proposta original, o algoritmo NSA possui três passos básicos:

- Defina próprio como uma coleção de cadeias S de tamanho limitado, que precisa de proteção ou monitoramento.
- Gere cadeias aleatoriamente e avalie a similaridade entre cada uma delas e as cadeias S (conjunto próprio). Caso a similaridade seja superior a um determinado limiar, isto indica que houve um reconhecimento (detecção) do conjunto próprio, e que, portanto, a cadeia deve ser rejeitada; caso contrário armazene-a em um conjunto de detectores.
- Monitore possíveis alterações no conjunto de cadeias que se deseja proteger utilizando os detectores gerados anteriormente. Caso a similaridade entre um detector e uma das cadeias de S seja maior que um limiar pré-estabelecido, diz-se que uma anomalia ocorreu, tendo em vista que os detectores nunca devem reconhecer cadeias do conjunto próprio. A Figura 2 ilustra a proposta original do Algoritmo de Seleção Negativa.

Figura 2 - Diagrama de funcionamento do Algoritmo de seleção negativa



Fonte: Adaptado de Castro (2001)

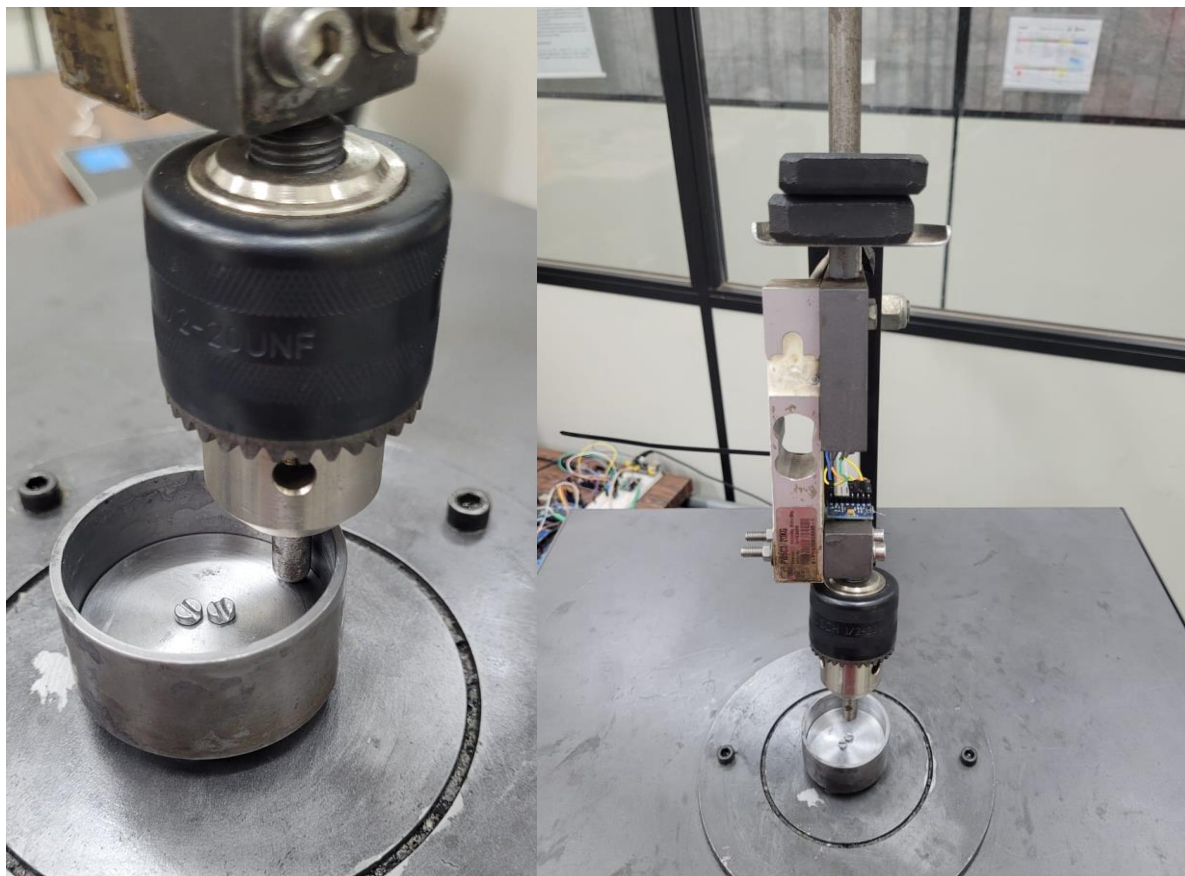
O principal uso do NSA é na detecção de anomalias, onde os detectores são produzidos no espaço complementar, permitindo a detecção de mudanças nos padrões de dados. O componente principal do algoritmo de seleção negativa é a seleção da regra de detecção, que

estabelece a correspondência entre dois padrões para categorizar as amostras em próprias ou não próprias (normal ou anormal). É necessária uma estimativa do número de detectores para garantir um certo grau de precisão na identificação da anomalia. Se um limiar de detecção muito alto for utilizado, os detectores gerados tornar-se-ão sensíveis a qualquer anomalia nos dados, e, portanto, um maior número de detectores será necessário para atingir o grau de confiabilidade desejado. Por outro lado, se o limiar for muito baixo, pode ser impossível gerar um conjunto de detectores de tamanho razoável a partir do conjunto próprio disponível. Isto sugere que o valor do limiar pode ser usado para ajustar a sensibilidade da detecção e diminuir o risco de falsos positivos.

5. Materiais e métodos

Para realizar a análise das graxas, utiliza-se uma máquina PIN ON DISK, a qual realizará a rotação de um disco em um recipiente que será preenchido por graxa e atritará com um pino. A máquina PIN ON DISK é apresentada na Figura 3.

Figura 3 - PIN ON DISK



Fonte: Autoria própria

A máquina PIN ON DISK, é equipada com uma célula de carga, um amplificador de sinais e um acelerômetro. A célula de carga é utilizada para quantificar o atrito entre o pino e o disco, assim, a deflexão na célula de carga representa justamente o atrito do movimento. Ela serviu como suporte para o mandril que mantém o pino. O uso do amplificador HX711 é recomendado para a leitura dos sinais. O sensor de aceleração, acelerômetro, utilizado para coleta da aceleração nos três eixos é o modelo MPU6050, ilustrado pela Figura 4. Tanto a célula de carga quanto o acelerômetro devem ser devidamente calibrados.

Figura 4 - Acelerômetro MPU6050



Fonte: Eletrogate (2025)

Esses sensores são ligados a placas Arduino, um Arduino UNO e outro Arduino Mega 2560, para a coleta de dados. Estas placas também realizam o controle do sistema da máquina e a manipulação dos dados.

Como a análise é voltada para sistemas mecânicos utilizados cotidianamente, o material do disco e do pino são semelhantes aos utilizados em anéis e camisas de pistão, aço SAE 1040. O disco apresenta 56 mm de diâmetro e uma espessura de 5 mm, já o pino apresenta 10 mm de diâmetro e 50 mm de comprimento. O pino e o disco são apresentados na Figura 5.

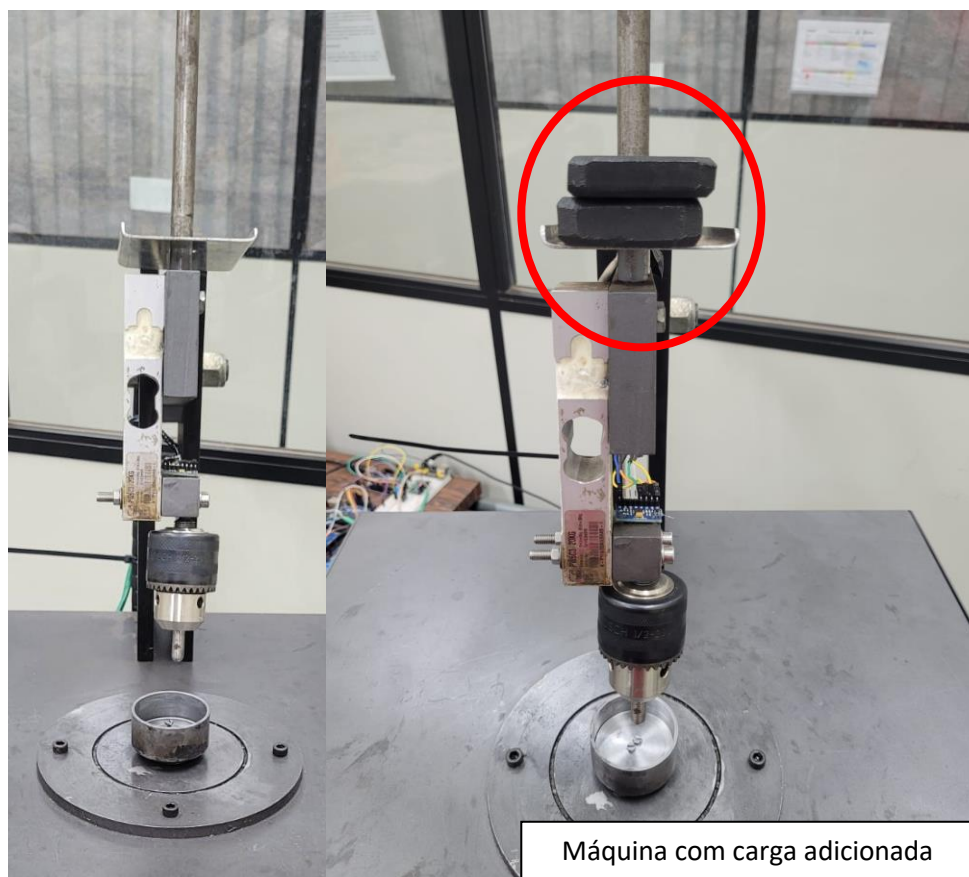
Para que haja reprodutibilidade dos testes, a posição do pino em relação ao disco deve ser a mesma em todos os ensaios, nesse caso utilizou-se como referência para o pino 17 mm de distância do centro do disco.

Figura 5 - Geometria do pino e do disco



Fonte: Autoria própria

Antes de serem inseridos, disco e pino, o recipiente que conterá a graxa deve ser limpo com querosene desodorizada PA. Com o intuito de comparar o comportamento das graxas em diferentes situações, insere-se também à máquina cargas, as quais alterarão o comportamento vibracional do sistema, assim como a alteração da velocidade entre os ensaios. Tais cargas, são inseridas acima do mandril, sendo estas cargas pesadas, anteriormente, em uma balança de precisão. A Figura 6 destaca a inserção de cargas à máquina.

Figura 6 - Inserção de carga no PIN ON DISK

Fonte: Autoria própria

Os diferentes tipos de ensaios que devem ser realizados por cada graxa são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Ensaios realizados nas amostras de graxa

	Velocidade (RPM)	Carga (kg)
AMOSTRA	60	1,127
		3,103
	240	1,127
		3,103

Fonte: Autoria própria

Sendo, a quantidade de graxa utilizada em cada ensaio de 5 gramas, a distância percorrida pelo pino no disco de 5000 metros e a velocidade, assim como a carga, mantidas constantes durante o ensaio. Para a contagem de revoluções do disco, utilizou-se um tacômetro da marca Oppama modelo Pet - 2000 DX. As informações sobre as graxas utilizadas são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Informações sobre as graxas utilizadas

TIPO DE GRAXA	GRAXA	COMPOSIÇÃO	PONTO DE GOTA (20°C)	PENETRAÇÃO TRABALHADA (1/10 mm)	GRAU NLGI
Bio-graxa	LGQ01	Óleo de soja à base de sódio (10%)	103	365	0
	LGQ02	Óleo de soja à base de sódio (20%)	118	320	1
	LGQ03	Óleo de soja à base de sódio (30%)	149	279	2
Graxa mineral (Padrão)	Azul	Óleo mineral à base de lítio (7-10%)	201	290	2

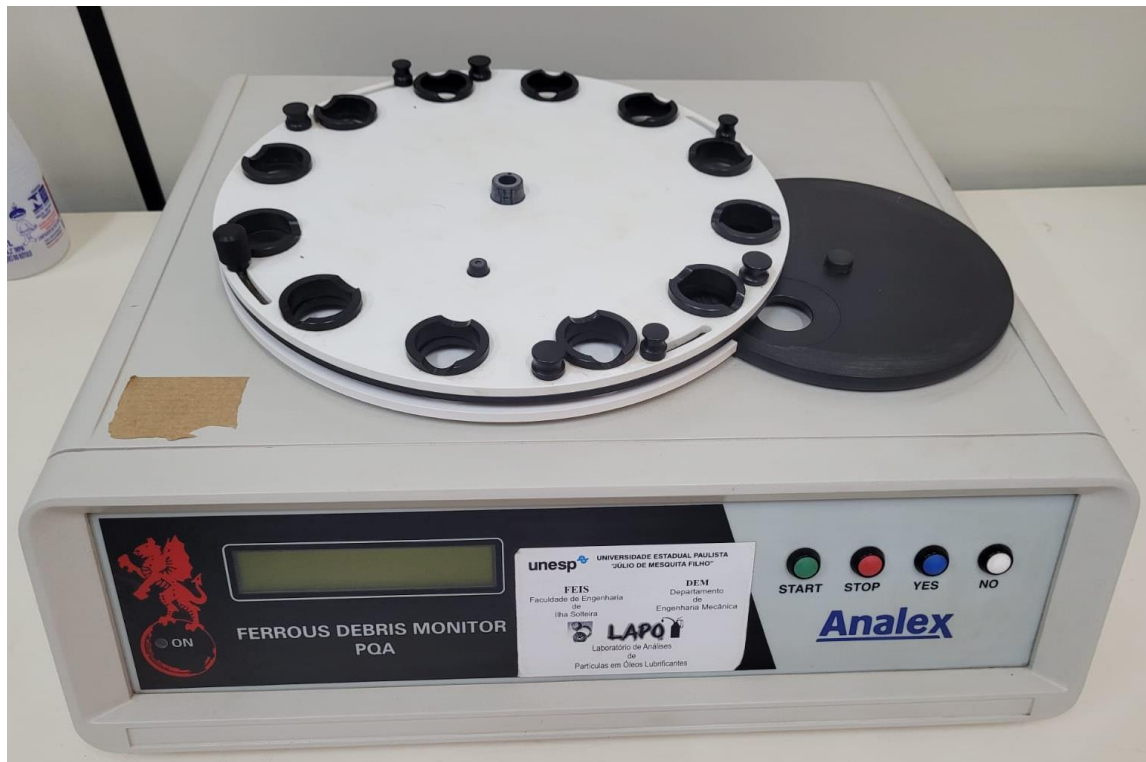
Fonte: Autoria própria

Tais bio-graxas, foram desenvolvidas a partir de um processo direto de saponificação do bio-óleo (à base de soja), nas proporções de 10, 20 e 30% de hidróxido em relação ao óleo básico, permitindo a sua produção.

Os dados (forças, normal e de atrito, e vibração) foram examinados utilizando um algoritmo de sistema imunológico artificial de seleção negativa, criado e desenvolvido pelo Prof. Doutor Fábio Roberto Chavarette (ID Lattes: 5723359885365339). Tendo como finalidade de realizar um diagnóstico. É importante destacar que os sinais de vibração, adquiridos no domínio do tempo e convertidos para o domínio da frequência.

Após cada ensaio, deve-se coletar a graxa utilizada, higienizar o recipiente e trocar o disco e o pino desgastados. Com as graxas coletadas, deve-se inseri-las em um monitor automático de partículas (PQA) devidamente calibrado, o qual apresentará o índice PQ das graxas coletadas, deve-se realizar dez medições do índice PQ para cada amostra. O PQA é apresentado na Figura 7.

Figura 7 – Monitor automático de partículas (PQA)



Fonte: Autoria própria

6. Resultados e discussão

Após realizados os ensaios, fez-se a análise vibracional do sistema, os dados coletados foram tratados e processados em um algoritmo de sistema imunológico, sendo o sinal de vibração da graxa azul considerado como sinal padrão. Assim, obteve-se a Tabela 4, onde são apresentadas a afinidade da vibração de cada ensaio em comparação com os ensaios da graxa padrão.

Tabela 4 – Afinidades vibracionais das graxas

ENSAIO	GRAXA	AFINIDADE
CARGA 1,127 kg VELOCIDADE 60 RPM	LGQ01	100,00%
	LGQ02	100,00%
	LGQ03	52,05%
CARGA 3,103 kg VELOCIDADE 60 RPM	LGQ01	100,00%
	LGQ02	100,00%
	LGQ03	28,03%
CARGA 1,127 kg VELOCIDADE 240 RPM	LGQ01	97,50%
	LGQ02	50,00%
	LGQ03	100,00%
CARGA 3,103 kg VELOCIDADE 240 RPM	LGQ01	100%
	LGQ02	97,44%
	LGQ03	71,79%

Fonte: Autoria própria

Para uma substituição eficaz da graxa azul, a afinidade das graxas analisadas deve ser maior do que 75%. Porém, esse limiar não é alcançado para a bio-graxa LGQ02 em um dos ensaios, carga 1,127 kg e velocidade de 240 RPM, obtendo uma afinidade de apenas 50,00%. A graxa LGQ03 apresentou as menores afinidades, sendo 3 das 4 obtidas menores que o patamar de 75%, assim como a LGQ02, a graxa LGQ03 não apresentou resultados satisfatórios.

A partir da Tabela 4, infere-se que as graxas LGQ02 e LGQ03 apresentam o seu comportamento vibracional divergente da graxa padrão, mineral azul, e que apenas a bio-graxa LGQ01 apresenta o seu comportamento próximo da graxa comercial. Mas essa diferença vibracional das bio-graxas LGQ02 e LGQ03, apenas mostra que elas possuem um comportamento vibracional diferente da graxa padrão, assim, essa análise não invalida as suas propriedades tribológicas.

Após a utilização do PQA, obteve-se a Tabela A. 1, com os 10 índices PQ para cada amostra, tal tabela é apresentada no Apêndice A. A partir da Tabela A. 1, obteve-se a Tabela 5, onde são apresentados as médias e o desvio padrão amostral dos índices PQ para cada ensaio.

Tabela 5 - Dados obtidos com os índices PQ

ENSAIO	GRAXA	ÍNDICE PQ
CARGA 1,127 kg VELOCIDADE 60 RPM	MINERAL AZUL	11,5 ± 2,0
	LGQ01	57,8 ± 10,6
	LGQ02	159,8 ± 4,5
	LGQ03	555 ± 14,3
CARGA 3,103 kg VELOCIDADE 60 RPM	MINERAL AZUL	77,9 ± 6,1
	LGQ01	901,6 ± 5,4
	LGQ02	332,7 ± 3,4
	LGQ03	513,2 ± 13,3
CARGA 1,127 kg VELOCIDADE 240 RPM	MINERAL AZUL	655,7 ± 63,4
	LGQ01	161,6 ± 7,9
	LGQ02	99 ± 2,4
	LGQ03	6775,9 ± 1,9
CARGA 3,103 kg VELOCIDADE 240 RPM	MINERAL AZUL	46,9 ± 4,3
	LGQ01	127,4 ± 4,8
	LGQ02	317,4 ± 1,2
	LGQ03	19222,2 ± 141,9

Fonte: Autoria própria

Ao analisar-se a Tabela 5, nota-se uma diferença considerável entre os índices PQ da graxa LGQ01 em relação à graxa padrão, mineral azul. Como as graxas LGQ02 e LGQ03 não atingiram a afinidade vibracional esperada, a análise do desgaste foi feita somente para a graxa LGQ01. Onde calculou-se o erro percentual entre seus índices PQ e os índices da graxa padrão, tais erros percentuais são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Erro percentual entre o índice PQ da graxa LGQ01 e a graxa padrão

ENSAIO	ERRO PERCENTUAL
CARGA 1,127 kg VELOCIDADE 60 RPM	$(402,6 \pm 179,2)\%$
CARGA 3,103 kg VELOCIDADE 60 RPM	$(1057,4 \pm 97,6)\%$
CARGA 1,127 kg VELOCIDADE 240 RPM	$(75,4 \pm 18,2)\%$
CARGA 3,103 kg VELOCIDADE 240 RPM	$(171,6 \pm 35,2)\%$

Fonte: Autoria própria

A partir da Tabela 6, observa-se que os índices PQ apresentam uma discrepância com os índices obtidos para a graxa mineral azul, apresentando um maior desgaste, assim, a graxa LGQ01 apresentou neste teste um resultado que diverge da graxa mineral. De forma similar ao teste anterior, essa análise também não invalida as suas propriedades tribológicas.

Slavec (2020) Realizou testes similares com as graxas LGQ01, LGQ02 e LGQ03, além de testar graxas à base de lítio. Os parâmetros utilizados por ele são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Parâmetros definidos para os experimentos

Parâmetros	Valores
Distância [m]	1000
Velocidade de rotação [rpm]	60
Velocidade [m/s]	0,0879
Carga [kg]	1,02
Força Normal [N]	10
Lubrificante (g)	5

Fonte: Slavec (2020)

As informações das graxas à base de lítio, LGQ07, LGQ08 e LGQ09, são apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 - Descrição dos lubrificantes

Bio-graxa	Composição	Ponto de Gota (°C)	Penetração trabalhada (1/10 mm)	Grau NLGI
LGQ07	Óleo de soja à base de lítio (10%)	133	390	0
LGQ08	Óleo de soja à base de lítio (20%)	156	368	0
LGQ09	Óleo de soja à base de lítio (30%)	165	346	1

Fonte: Slavec (2020)

Vale ressaltar que as amostras utilizadas por Slavec (2020) e nesta tese, foram desenvolvidas a partir de um processo direto de saponificação do bio-óleo, nas proporções de 10, 20 e 30% de hidróxido em relação ao óleo básico, permitindo assim a produção das bio-graxas.

Slavec conclui a partir da análise artificial de seleção negativa dos sinais de vibração, que as graxas LGQ01, LGQ02 e LGQ03 foram classificadas nos quatro níveis de severidade. Inclusive, a amplitude alcançada pelos sinais dentro do nível de severidade “muito alto” demonstra o quão agressivo foram os ensaios, o que comprova o desempenho insatisfatório desse grupo. Dessa forma, os dados desta tese são corroborados pelos ensaios realizados por Slavec (2020).

Com relação as bio-graxas à base de lítio, Slavec (2020) informa que a amostra LGQ07 apresentou uma performance semelhante a graxa mineral comercial. Porém, a bio-graxa LGQ08, ainda que não exibisse desempenhos satisfatórios, demonstra que através de possíveis modificações químicas, como a adição de aditivos por exemplo, possa adquirir melhores propriedades e ter uma melhor performance. Já a bio-graxa LGQ09 teve um desempenho insatisfatório, similar ao grupo de bio-graxas à base de sódio.

Portanto, as bio-graxas analisadas nesta tese não apresentaram o comportamento esperado, avaliação feita por análise de vibrações e contagem magnética de partículas. Assim, estas não foram validadas como substitutas para a graxa mineral azul por meio destes ensaios, resultado corroborado por Slavec (2020). Apesar de não validadas, os testes e análises realizadas não invalidam as propriedades tribológicas das bio-graxas, e nem descartam o seu uso.

Nota-se também 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 bio-graxas LGQ01, LGQ02 e LGQ03 são produzidas com espessantes de sódio, já as bio-graxas LGQ07 a 09 com espessantes de lítio. (Slavec, 2020).

7. Conclusão

O objetivo foi concluído com êxito, uma vez que se analisou e comparou-se as bio-graxas através da vibração e do desgaste de um sistema mecânico. Apesar do êxito no cumprimento do objetivo, as bio-graxas analisadas não atenderam às expectativas, por isso elas não foram validadas como substitutas para a graxa mineral azul, de uso comercial.

As graxas LGQ02 e LGQ03 apresentaram o seu comportamento vibracional divergente da graxa padrão, mineral azul. Mas essa diferença vibracional das bio-graxas LGQ02 e LGQ03, apenas mostra que elas possuem um comportamento vibracional diferente da graxa padrão, assim, a análise vibracional não invalida as suas propriedades tribológicas.

Os índices PQ de todas as três bio-graxas divergiram bastante em relação à graxa padrão, porém como a graxa LGQ01 era a única que cumpriu o requisito da etapa anterior, fez-se uma análise com enfoque nela onde se calculou os erros percentuais de seus índices PQ, em relação à graxa padrão. Obteve-se erros percentuais elevados, o que caracteriza desgastes maiores em relação à graxa padrão, de uso comercial. De forma similar à análise de vibrações, essa análise também não invalida as suas propriedades tribológicas.

Comparando os resultados obtidos nesta tese com os resultados apresentados por Slavec (2020), o qual utilizou parâmetros de testes próximos ao desta tese, pode-se reafirmar o desempenho insatisfatório das graxas analisadas. Junto a isto, pode-se perceber que bio-graxas sintetizadas pelo mesmo processo de fabricação, porém com espessantes diferentes, podem apresentar resultados satisfatórios.

Assim, conclui-se que o espessante apresenta forte influência no desempenho das bio-graxas, e que através de possíveis modificações químicas, como a adição de aditivos por exemplo, possam adquirir melhores propriedades e ter uma melhor performance.

As três bio-graxas avaliadas não obtiveram resultados satisfatórios nos testes realizados, assim, elas não puderam ser validadas, sendo a avaliação feita por análise de vibrações e contagem magnética de partículas. Com isso, estas não foram validadas como substitutas para a graxa mineral azul, resultado corroborado por Slavec (2020). Apesar de não validadas, os testes e análises realizados não invalidam as propriedades tribológicas das bio-graxas, e nem descartam o seu uso.

Portanto, deve-se avaliar graxas com composições diferentes das utilizadas, ou até mesmo outros tipos de análises devem ser feitas para validar tais bio-graxas.

8. 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, 2015.
- AGUILLON, P. R. A. *Tribologia y lubricacion industrial y automotriz*. 2. ed. Bucaramanga: Lt Ochoa, 1993.
- 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.
- ARATO JUNIOR, A. *Manutenção preditiva usando análise de vibrações*. Barueri: Manole, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 5462: confiabilidade e manutenibilidade. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.
- BAYER, R. G. *Mechanical wear fundamentals and testing*. 2. ed. New York: Marcel Dekker, 2004.
- BHUSHAN, B. *Introduction to tribology*. 2. ed. West Sussex: John Wiley & Sons, 2013.
- Boner, C. J. *Manufacture and application of lubricating greases*. New York, 1954.
- BRASIL. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis - ANP. *Lubrificantes*. Brasília, DF, 2020.
- CARRETEIRO, R. P.; BELMIRO, P. N. A. *Lubrificantes e lubrificação industrial*. Rio de Janeiro: Interciência: IBP, 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.
- 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, 2018.

COUSSEAU, T. Análise comparativa do comportamento de massas lubrificantes num rolamento axial de esferas. 2009. 189 p. Tese (Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, 2009.

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.

Eletrogate, Acelerômetro e Giroscópio 3 Eixos 6 DOF MPU-6050 - GY-521. Disponível em: <https://www.eletrogate.com/acelerometro-e-giroscopio-3-eixos-6-dof-mpu-6050-gy-521#:~:text=O%20sensor%20MPU%2D6050%20cont%C3%A9m,%2D40%20e%20%2B85%20%C2%BAC>. Acesso: 30/01/2025

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

GAHR, K. H. Z. Microstructure and wear of materials. Amsterdam: Elsevier, 1987.

GALVÃO, C. F. F.; INSTRUMENTAÇÃO E VALIDAÇÃO DE UM EQUIPAMENTO PINO SOBRE O DISCO, 2019.

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

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.

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

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

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: 18 nov. 2022.

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

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, 2018.

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

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

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, 2014.

RUDNICK, L.R. *Lubricants Additives: Chemistry and Applications*. 2 ed. Delaware: CRC Press, 2009. 796 p.

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

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

SLAVEC, G. A.; Dissertação, validação tribológica de biograxas sintetizadas comparadas com graxas minerais comerciais, 2020.

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

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.

YING, S.; YUPENG, Y. Temperature field analysis of pin-on-disk sliding friction test. *International Journal of Heat and Mass Transfer, Oxford*, v. 107, 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, 2018.

9. Apêndice

9.1 Apêndice A

Tabela A. 1 - Índices PQ obtidos

ENSAIO	GRAXA	ÍNDICE PQ									
CARGA 1,127 KG VELOCIDADE 60 RPM	MINERAL AZUL	15	11	11	9	13	13	9	10	13	11
	LGQ01	70	72	73	41	50	52	52	56	57	55
	LGQ02	168	162	162	158	162	156	156	159	152	163
	LGQ03	587	529	544	557	559	556	554	553	556	555
CARGA 3,103 KG VELOCIDADE 60 RPM	MINERAL AZUL	80	80	80	78	83	78	81	67	67	85
	LGQ01	895	892	898	902	903	903	900	908	908	907
	LGQ02	338	336	334	337	333	330	331	330	328	330
	LGQ03	508	509	509	551	809	508	508	511	510	509
CARGA 1,127 KG VELOCIDADE 240 RPM	MINERAL AZUL	663	664	680	674	670	672	668	551	549	766
	LGQ01	150	152	154	157	163	164	165	169	171	171
	LGQ02	100	101	98	102	101	100	98	97	99	94
	LGQ03	6777	6776	6774	6778	6778	6777	6777	6775	6775	6772
CARGA 3,103 KG VELOCIDADE 240 RPM	MINERAL AZUL	45	51	44	42	46	48	49	46	42	56
	LGQ01	115	130	131	132	129	129	129	127	125	127
	LGQ02	316	317	317	317	316	319	319	319	317	317
	LGQ03	19200	19200	19200	19200	19047	19464	19200	19464	19047	19200

Fonte: Autoria própria